



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
ECOLE DOCTORALE : SCIENCES DE LA VIE ET
DE L'ENVIRONNEMENT
SPECIALITE : BIOTECHNOLOGIE

THÈSE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE DOCTORAT

Gestion agroécologique de *Striga asiatica* (L.) Kuntze à base de systèmes de culture riz-maïs dans le Moyen Ouest du Vakinankaratra-Madagascar

Présentée par **Meva Tahiry RANDRIANJAFIZANAKA**

Soutenue publiquement le 10 janvier 2019

Devant les membres du Jury composés de :

Président	:	RAVELOSON RAVAOMANARIVO Lala Harivelo, Professeur, Université d'Antananarivo
Directeur de thèse	:	RATSIMIALA RAMONTA Isabelle, Professeur titulaire, Université d'Antananarivo
Co-directeur de thèse	:	RODENBURG Jonne, Docteur, Université de Greenwich
Rapporteur interne	:	RAFARASOA Lala Sahondra, Professeur, Université d'Antananarivo
Rapporteur externe	:	RAOELISON Guy, Professeur, Université d'Antananarivo
Examineur	:	RAZAFINJARA Aimé Lala, Directeur de Recherche, FOFIFA
Membre Invité	:	AUTFRAY Patrice, Docteur, CIRAD

AfricaRice



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
ECOLE DOCTORALE : SCIENCES DE LA VIE ET
DE L'ENVIRONNEMENT
SPECIALITE : BIOTECHNOLOGIE

THÈSE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE DOCTORAT

**Gestion agroécologique de *Striga asiatica* (L.) Kuntze
à base de systèmes de culture riz-maïs
dans le Moyen Ouest du Vakinankaratra-Madagascar**

Présentée par **Meva Tahiry RANDRIANJAFIZANAKA**

Soutenue publiquement le 10 janvier 2019

Devant les membres du Jury composés de :

Président	:	RAVELOSON RAVAOMANARIVO Lala Harivelo, Professeur, Université d'Antananarivo
Directeur de thèse	:	RATSIMIALA RAMONTA Isabelle, Professeur titulaire, Université d'Antananarivo
Co-directeur de thèse	:	RODENBURG Jonne, Docteur, Université de Greenwich
Rapporteur interne	:	RAFARASOA Lala Sahondra, Professeur, Université d'Antananarivo
Rapporteur externe	:	RAOELISON Guy, Professeur, Université d'Antananarivo
Examineur	:	RAZAFINJARA Aimé Lala, Directeur de recherche, FOFIFA
Membre Invité	:	AUTFRAY Patrice, Docteur, CIRAD

Remerciements

Avant tout, je remercie, le Seigneur Tout Puissant de m'avoir conduite et dirigée tout au long de mes parcours jusqu'à ce jour. Sans Lui, je n'aurai jamais eu cette grâce de terminer cette thèse ;

Ensuite, je tiens à exprimer mes vifs reconnaissances à :

- *Monsieur le Président de l'Université d'Antananarivo,*
- *Monsieur le Doyen de la Faculté des Sciences,*
- *Monsieur le Directeur de l'Ecole Doctorale Sciences de la Vie et de l'Environnement.*

Puis, je tiens à exprimer également mes sincères remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidée de près ou de loin à réaliser ce présent manuscrit, en particulier :

- *Professeur Lala Harivelo Raveloson, Enseignant Chercheur, Mention Entomologie : Culture, Elevage, Santé (ECEP) à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, qui a accepté de présider cette soutenance de thèse, et pour son appui lors de ma première inscription à l'Ecole Doctorale ;*

- *Professeur Isabelle Ratsimiala Ramonta, Enseignant Chercheur, Mention Biologie et Ecologie Végétales à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, mon directeur de thèse qui m'a accueillie et a bien voulu me consacrer du temps pour mon encadrement ;*

- *Docteur Jonne Rodenburg, mon co-directeur de thèse, ancien Chercheur de l'Africa Rice et Enseignant Chercheur de l'Université de Greenwich (Angleterre), m'ayant toujours bien dirigée avec ses précieuses suggestions tout au long de ma thèse ;*

- *Professeur Lala Sahondra Rafaraso, Enseignant Chercheur, Mention Entomologie : Culture, Elevage, Santé (ECEP) à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, Coordinateur du DP SPAD, ayant accepté d'être parmi les membres de jury en tant que rapporteur interne, sans oublier les encouragements qu'elle m'a donnée du début à la fin de cette thèse, en organisant des journées de Doctorants et de partages qui nous ont permis de nous améliorer à maintes reprises ;*

- *Professeur Raoelison Guy, Enseignant Chercheur, Responsable de la Mention Pharmacie à la Faculté de Médecine de l'Université d'Antananarivo, qui nous gratifie sa présence parmi les membres de jury en tant que rapporteur externe malgré ses nombreuses occupations ;*

- *Docteur Aimé Lala Razafinjara, Directeur de Recherche et Directeur Général du FOFIFA, pour son dévouement d'avoir accepté d'examiner ce présent manuscrit ;*

- *Docteur Patrice Autfray, Chercheur Enseignant du CIRAD et de l'IESAV Antsirabe, mon encadreur pour son appui et implication scientifique, technique et personnelle ainsi que sa disponibilité pour le bon déroulement de cette recherche ;*

- *Monsieur Alain-Paul Andrianaivo, Chercheur Enseignant phytopathologiste au FOFIFA Ambatobe, de m'avoir passé le flambeau de l'intérêt de la gestion de Striga asiatica à Madagascar ;*
- *Monsieur Pascal Marnotte, chercheur malherbologue au CIRAD Montpellier pour son chaleureux accueil et ses précieuses suggestions durant ma phase de rédaction ;*
- *Equipe du laboratoire de l'Université d'Antananarivo :*
Docteur Bako Harisoa Ravaomanalina Enseignante Chercheur et Madame Ravo Ramanantsialonana au laboratoire d'anatomie végétale de la Faculté des Sciences à l'Université d'Antananarivo pour leur aimable accueil.
- *Equipe du laboratoire du CIRAD Montpellier :*
Madame Christelle Baptiste, Docteur Jean-Luc Verdeil Chercheur au département UMR AGAP, du CIRAD à Montpellier pour leur disponibilité et encadrement au sein de leur laboratoire.
- *Equipe du DP SPAD d'Antsirabe :*
Docteurs Paulo Salgado et Patrice Autfray, Mademoiselle Miora Rakotoarivelo Messieurs Hery Zo Rakotofiringa, Narcisse Moussa et Rakotomanantsoa, Ralaifara Joseph, ainsi que les jeunes paysans d'Ivory pour les encouragements et les partages des moments agréables ;
- *Equipe du DP SPAD d'Antananarivo :*
Professeur Lala Sahondra Rafaraso, Madame Hary Rakotondrazafy, Docteurs Bertrand Muller et Jean-François Bélière pour leurs appuis et disponibilité ;
- *Les doctorants du DP SPAD : Tatiana, Laingo, Lalaina, Njaka, Antsa et Elias ;*
- *Equipe du FOFIFA d'Antsirabe :*
Docteur Alain Ramanantsoanirina, Docteur Richard Randriamanantsoa, Docteur Bodo Rabary, Joël Rakotomalala, Mama Manda ;
- *Sans oublier le DP SPAD, l'Africa Rice center et le CIRAD pour leurs appuis scientifique, technique et financier durant ces longues années de recherche ;*
- *Enfin ma famille : Dada, Fano, Mino, Soary, tatie Jocelyne, oncle Haveloma, Lovasoa, Avotra, Seheny et Maeva pour leur amour, soutien moral, logistique et financier.*

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	I
TABLE DES MATIERES	III
LISTE DES FIGURES ET PHOTOS.....	VII
LISTE DES TABLEAUX	X
LISTE DES ABREVIATIONS.....	XII
GLOSSAIRE.....	XIII
LISTE DES ANNEXES	XV
 INTRODUCTION GENERALE.....	 1
 CHAPITRE 1 : CONTEXTE DE L’ETUDE ET SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	 5
 I-1. Zone d’étude : le Moyen Ouest du Vakinankaratra et ses contraintes	 6
I-1.1. Milieu naturel ou physique	6
I-1.1.1 Localisation géographique	6
I-1.1.2 Localisation administrative.....	6
I-1.1.3 Géomorphologie	7
I-1.1.4 Climat et végétation.....	7
I-1.2. Milieu socio-économique	8
I-1.2.1. Population.....	8
I-1.2.2. Activités agricoles : Système de production et système de culture	8
 I-2. Etat de l’art	 10
I-2.1. <i>Striga asiatica</i>	10
I-2.1.1. Biologie et écologie	10
I-2.1.2. Impacts sur les plantes hôtes	17
I-2.1.3. Méthodes de lutte	18
I-2.2. Agroécologie	20
II-2.2.1. Définition et Principes	20
I-2.2.2. Historique de la pratique.....	20
I-2.3. Agriculture de conservation.....	21
I-2.3.1. Avantages	21

I-2.3.2. Limites	22
I-2.4. <i>Striga asiatica</i> et agroécologie	22
I-2.4.1. Différents modes de gestion de <i>Striga asiatica</i>	22
I-2.4.3. Utilisation de l'agriculture de conservation pour lutter contre <i>Striga asiatica</i>	23
 CHAPITRE 2 : EFFETS DES SYSTEMES DE CULTURE ET DE VARIETES DE RIZ SUR L'INFESTATION DE <i>STRIGA ASIATICA</i> (L.) KUNTZE DANS DES ROTATIONS CULTURALES RIZ-MAÏS	24
II.1. Introduction	25
II.2. Matériels et méthodes	27
II.2.1. Site d'étude.....	27
II.2.2. Traitements expérimentaux et matériel végétal.....	28
II.2.3. Dispositif expérimental	29
II.2.4. Préparations sur le terrain et gestion des cultures.....	32
II.2.5. Mesures et observations	37
II.2.6. Analyses statistiques des données	38
II.3. Résultats	39
II.3.1. Variation de l'azote et du phosphore dans le sol.....	39
II.3.2. Dates d'émergence de <i>Striga asiatica</i> dans le riz et le maïs	40
II.3.3. Densités de pieds de <i>Striga asiatica</i> dans le riz	42
II.3.4. Densités de pieds de <i>Striga asiatica</i> chez le maïs	44
II.3.5. Variation de la banque de semences de <i>Striga asiatica</i> du sol.....	44
II.3.6. Effets des pratiques culturales et de la variété de riz sur la biomasse de mauvaises herbes ordinaires.....	45
II.4. Discussion.....	46
II.4.1. Agriculture de conservation et lutte contre les mauvaises herbes	47
II.4.2. Agriculture de conservation - variétés résistantes et effets	50
II.4.3. Implications des petits producteurs de céréales dans les zones exposées à l'infestation de <i>Striga asiatica</i>	52
II.5. Conclusion partielle.....	53

CHAPITRE 3 : EFFETS DES SYSTEMES DE CULTURE ET DES VARIETES DE RIZ SUR LES PERFORMANCES DES CULTURES EN ROTATION.....55

III-1. Introduction	56
III-2. Matériels et méthodes.....	58
III- 2.1. Traitements expérimentaux	58
III-2.2. Mesures et observations	58
III-2.3. Analyses des données	61
III-3. Résultats	61
III-3.1. Rendement des grains de riz et de biomasse	61
III.3.2. Rendements du maïs et des légumineuses et biomasse	63
III-3.3. Variation de la fertilité et de l'érosion du sol selon les pratiques culturales	67
III-4. Discussion.....	67
III-4.1. Avantages de la gestion des systèmes de cultures et des variétés sur la production des graines	69
III.4.2. Bénéfices apportés par la biomasse, les couvertures sur la fertilité du sol.....	72
III-5. Conclusion partielle.....	74

CHAPITRE 4 : EFFET DES PAILLAGES SUR L'EMERGENCE DE *STRIGA ASIATICA* (L.) KUNTZE EN CHAMP INOCULE.....75

IV-1. Introduction	76
IV-2. Matériels et méthodes.....	77
IV-2.1. Site d'étude	77
IV-2.2. Traitements expérimentaux	78
IV-2.3. Dispositif expérimental	78
IV-2.4. Préparation du terrain et gestions des cultures	79
IV-2.5. Mesures et observations	80
IV-2.5.1. Facteurs abiotiques ou microclimats	80
IV-2.5.2. Développement de <i>Striga asiatica</i>	81
IV-2.6. Analyses des données	82

IV-3	Résultats	83
IV-3.1.	Facteurs abiotiques ou microclimats:	83
IV-3.1.1.	Pluviométrie du site d'étude	83
IV-3.1.2.	Humidité du sol sous les paillages.....	83
IV-3.1.3.	Température du sol	85
IV-3.2.	Infestation de <i>Striga asiatica</i>	90
IV-3.2.1.	Estimation de la densité des graines de <i>Striga asiatica</i> avant la mise en place des cultures	90
IV-3.2.2.	Premières dates séparant les différentes étapes de développement du cycle de <i>Striga asiatica</i>	90
IV-3.2.3.	Densité de pieds de <i>Striga asiatica</i>	91
IV-3.2.4.	Productions de <i>Striga asiatica</i> à la fin de son cycle : capsules et biomasses ...	95
IV-4.	Discussions	98
IV-4.1.	Impacts des paillages sur le microclimat du sol	98
IV-4.2.	Influence de la nature des couvertures sur l'émergence de <i>Striga asiatica</i>	98
IV-4.3.	Influence des facteurs températures et microclimats sur l'émergence de <i>Striga asiatica</i>	99
IV-5.	Conclusion partielle.....	100
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES		102
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		105
ANNEXES		I
ABSTRACT		ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
RESUME		ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

Liste des figures et photos

Figures :

<i>Figure 1 : Carte du Moyen Ouest dans la Région du Vakinankaratra</i>	<i>6</i>
<i>Figure 2 : Dessin botanique de Striga asiatica.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 3 : Cycle biologique de Striga asiatica</i>	<i>15</i>
<i>Figure 4 : Répartition de Striga asiatica en Afrique Subsaharienne</i>	<i>17</i>
<i>Figure 5 : Précipitations mensuelles (mm) par saison de culture, pendant les quatre saisons de 2011-2012 (S1) à 2014-2015 (S4) et la moyenne sur 11 ans.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 6 : Dispositif expérimental en split plot avec les pratiques culturales et les variétés de riz et les répétitions, de la 1^{ère} et de la 3^{ème} saison.</i>	<i>30</i>
<i>Figure 7 : Dispositif expérimental en split plot avec les pratiques culturales et les variétés de riz et les répétitions, de la 2^{ème} et de la 4^{ème} saison.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 8 : Représentation d'une parcelle de riz.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 9: Représentation des parcelles de maïs en labour ou associé avec des légumineuses</i>	<i>34</i>
<i>Figure 10 : Espacement et agencement des plantes en semis doubles rangs de maïs en CONV</i>	<i>36</i>
<i>Figure 11 : Espacement et agencement des plantes en semis doubles rangs de maïs en ACNM</i>	<i>36</i>
<i>Figure 12 : Espacement et agencement des plantes en semis doubles rangs de maïs en ACHR</i>	<i>37</i>
<i>Figure 13 : Espacement et agencement des plantes en semis doubles rangs de maïs en ACST</i>	<i>37</i>
<i>Figure 14: Poids sec de la biomasse de mauvaises herbes en saison 4.....</i>	<i>46</i>

<i>Figure 15: Causes présumées directes et indirectes entre les composantes de l'agriculture de conservation (AC), plantes de couverture, paillage des résidus de culture, du zéro labour et Striga asiatica.</i>	<i>48</i>
<i>Figure 16 : Représentation schématique d'une parcelle expérimentale.....</i>	<i>79</i>
<i>Figure 17 : Pluviométrie décadaire du site d'étude durant la saison culturale 2015-2016.</i>	<i>83</i>
<i>Figure 18 : Variation de l'amplitude thermique (maximum, moyenne et minimum) du sol pendant les 19 semaines de la saison expérimentale en fonction de la couverture du sol : sol nu (a) et sol couvert avec Stylosanthes guianensis (b) sur deux points de mesure : externe (0 cm) et interne (-2,5 cm).....</i>	<i>85</i>
<i>Figure 19 : Variation de l'amplitude thermique du sol pendant les 19 semaines de la saison expérimentale (S48-S13), à 2,5 cm de profondeur sous des paillages inertes comparée au témoin sol nu.</i>	<i>88</i>
<i>Figure 20 : Variation de l'amplitude thermique du sol pendant les 19 semaines de la saison expérimentale (S48-S13), à 2,5 cm de profondeur sous différents types de paillages : (b) M. pruriensis, (c) V. unguiculata, (d) V. umbellata, et (e) S. guianensis ; comparée au témoin sol nu.....</i>	<i>89</i>
<i>Figure 21 : Effet de la couverture du sol sur les premières dates de la levée et de la floraison de Striga asiatica en phase aérienne en fonction de la nature des paillages du sol</i>	<i>91</i>
<i>Figure 22 : Répartition du Striga asiatica dans le temps : (a) : 70 JAS, (b) : 85 JAS (c) : 100 JAS et (d) : 115 JAS ; en fonction des paillages du sol et des étapes de son cycle biologique.....</i>	<i>96</i>
<i>Figure 23 : Teneur en eau et taux de matières sèches de Striga asiatica des différents paillages du sol.....</i>	<i>97</i>

Photos :

<i>Photo 1 : Paysage panoramique de rizière du Moyen Ouest du Vakinankaratra.....</i>	<i>8</i>
<i>Photo 2 : Striga asiatica.....</i>	<i>11</i>

<i>Photos 3 : Planche 1-tiges, feuilles, fleurs et fruits de Striga asiatica</i>	<i>13</i>
<i>Photos 4 : (a) Striga asiatica adulte et (b) graines de Striga asiatica.....</i>	<i>14</i>
<i>Photo 5 : Vue aérienne du dispositif expérimental de la saison 4 (2014-2015)</i>	<i>32</i>
<i>Photo 6 : Vue globale des parcelles après semis du riz.....</i>	<i>80</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Teneur en azote total du sol en S1 (2011) et S2 (2015)</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 2 : Date d'émergence et nombre maximal de Striga asiatica dans les parcelles de riz et de maïs.</i>	<i>40</i>
<i>Tableau 3 : Première date d'émergence de Striga asiatica dans le riz et le maïs.....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 4 : Densité maximale de Striga asiatica dans les parcelles de riz et de maïs.....</i>	<i>43</i>
<i>Tableau 5 : Stock de graines de Striga asiatica dans le sol à la fin de l'expérimentation</i>	<i>45</i>
<i>Tableau 6 : Dates de récolte des céréales pendant les expériences de la saison 1 à 4 (S1-S4) pour toutes les cultures.</i>	<i>59</i>
<i>Tableau 7 : Teneur en azote et en phosphore (en %) de la biomasse, des différentes variétés de riz et des espèces cultivées (avril-août 2015).</i>	<i>60</i>
<i>Tableau 8 : Rendements par saison culturale (S1-S4) du riz et de la biomasse de ses pailles (t.ha⁻¹)</i>	<i>62</i>
<i>Tableau 9 : Rendements par saison culturale (S1-S4) de maïs et de biomasse de couverture de maïs.....</i>	<i>64</i>
<i>Tableau 10 : Rendement en maïs (a) et biomasse de couverture de maïs (b), en t.ha⁻¹, de la 4^{ème} saison culturale.....</i>	<i>66</i>
<i>Tableau 11 : Teneur en N-total et P-assimilable pendant les 4 saisons (S1-S4) dans les parcelles de riz et de maïs sans ajout de Phosphore.</i>	<i>68</i>
<i>Tableau 12 : Taux d'humidité du sol (en %) durant huit semaines de décembre à janvier avec les six traitements (sol nu, inerte, Mucuna pruriensis, Vigna unguiculata, Vigna umbellata et Stylosanthes guianensis).</i>	<i>84</i>
<i>Tableau 13 : Analyse de la variance et moyennes des températures du sol en fonction de l'amplitude thermique (AT) dans la journée, de la couverture du sol (C), de leurs</i>	

<i>points de mesures (PM) et de leurs interactions, pendant les 19 semaines de la saison expérimentale (2015-2016).</i>	<i>86</i>
<i>Tableau 14 : Variations de l'amplitude thermique du sol dans la journée à 2,5 cm de profondeur en fonction des différents paillages du sol et de leurs interactions, pendant les 19 semaines de la saison expérimentale.....</i>	<i>88</i>
<i>Tableau 15 : Densité de graines de Striga asiatica par m² sur les trois niveaux de profondeur (0-5, 5-10 et 10-20 cm) en fonction des paillages du sol et de leur interaction.</i>	<i>90</i>
<i>Tableau 16 : ANOVA sur les premières dates des différents stades de développement de Striga asiatica des différents paillages du sol.</i>	<i>90</i>
<i>Tableau 17 : Nombre maximal de pieds Striga asiatica au cours de la saison culturale après une analyse de la variance et une comparaison des moyennes en fonction des traitements comparés.</i>	<i>92</i>
<i>Tableau 18 : Nombre total de Striga asiatica à différentes dates d'observation.....</i>	<i>93</i>
<i>Tableau 19 : Analyse de la variance de la densité moyenne de Striga asiatica par dates d'observation, en fonction des différents types de paillages (P), des stades de développement (Ph) et de leur interaction.....</i>	<i>94</i>
<i>Tableau 20 : Analyse de la variance du poids et du taux de matières sèches moyennes de Striga asiatica au moment de la récolte, avec la comparaison de leurs moyennes en fonction des paillages du sol.....</i>	<i>97</i>

Liste des abréviations

AC : Agriculture de conservation

ACHR : Agriculture de conservation avec association des cultures de haricot-riz

ACNM : Agriculture de conservation avec association des cultures de niébé et *Mucuna*

ACST : Agriculture de conservation avec association des cultures de *Stylosanthes*

asl : above sea level

CIRAD : Centre International de Recherche Agronomique

CONV : Agriculture conventionnelle

DAS : Days After Sowing

DP-SPAD : Dispositif en Partenariat Système de Production d'Altitude et de Durabilité

ETM : Ecart-type de la Moyenne

F : test F test de Fisher

FOFIFA : Foibem-pirenena momban' ny Fikarohana ampiharina amin'ny Fampandrosoana ny eny ambanivohitra (ou Centre national de recherche appliquée au développement rural)

GSDM : Groupement Semis Direct de Madagascar

JAS : Jours Après Semis

LSD : Least Significant Difference

NERICA : NEw RIce for afriCA

P : ou valeur-P ou la probabilité pour un modèle statistique donné

RCBD : Randomized Complete Block Design

RCP : Résidus des cultures des plantes

SCV : Semis direct sur Couverture Végétale

SED : Standard error of difference

TDR : Time Domain Reflectometry

V : Taux de saturation du sol

Glossaire

Agriculture de conservation : ensemble de pratiques associant, le non-travail ou un travail minimal du sol, la présence d'une couverture végétale permanente et le semis-direct en son sein et la diversification culturale dans le temps ; d'origine brésilienne, elle fait notamment l'objet d'une promotion dans les pays du sud avec l'appui de la FAO ; ce modèle fait partie de l'agroécologie.

Agroécologie : concept utilisé en agriculture et en agronomie qui, selon l'usage peut désigner une discipline scientifique, un mouvement social ou un ensemble de pratiques agricoles basés sur la valorisation des processus écologiques pour la production agricole.

Allélopathie : (*allelon* et *pathos*) tout effet nuisible ou bénéfique direct ou indirect par une plante (y compris les microorganismes) à travers la production de composés chimiques qui se libèrent dans l'environnement.

Amplitude thermique : différence entre la température la plus élevée et la température la plus basse.

Dispositif en *split-plot* : il s'agit au départ d'un dispositif classique de bloc de Fischer où l'on répartit un des facteurs (exemple le système de culture) de manière aléatoire dans chaque bloc. Puis chacune des parcelles est redivisée avec l'autre facteur (la variété par exemple), toujours de manière aléatoire.

Dispositif en blocs aléatoires complets (ou blocs de Fisher) : Le dispositif comporte plusieurs ensembles ou blocs de parcelles où tous les traitements figurent une fois et une seule. Au sein d'un bloc, supposé homogène, les différents traitements sont affectés au hasard. L'intérieur d'un bloc est le plus homogène possible. En revanche, au sein d'un même terrain, les blocs sont les plus différents possibles les uns des autres.

Facteur : toute série d'éléments de même nature conditionnant le phénomène étudié, en agriculture c'est le comportement agronomique de la culture (par exemple la variété, la dose d'engrais, etc.).

Graminée : plante herbacée à fleur de la famille des Poaceae.

Haustorium : organe d'une plante ou d'un champignon parasite qui s'insère dans le tissu de la plante hôte pour absorber l'eau et les nutriments contenus dans la cellule.

Homoscédasticité : (*homos* et *skedasê*) en statistique, c'est une propriété fondamentale du modèle de la régression linéaire générale et fait partie de ses hypothèses de base.

Indice de récolte : rapport entre le rendement grains d'une plante cultivée et la quantité totale de biomasse qui a été produite, exprimés en matière sèche. Cet indice, sans dimension,

a une valeur comprise entre 0 et 1, il peut être aussi exprimé en pourcentage. Pour le riz, IR minimum = 0,34, IR moyenne = 0,42 et IR maximum = 0,55.

Légumineuse : plante appartenant à la famille des Fabaceae dont le fruit est une gousse.

Modalités : différents éléments qui constituent un facteur qualitatif (variété, nature des paillages).

Paillage : toute matière appliquée à la surface du sol comme couverture. Généralement, il peut être divisé en deux groupes : organique et synthétique.

Parasite : organisme animal ou végétal qui se nourrit strictement aux dépens d'un organisme hôte d'une espèce différente, de façon permanente ou pendant une phase de son cycle vital.

Plante C4 : plante caractérisée par un type de photosynthèse où les premières molécules synthétisées sont des acides organisées à 4 atomes de carbone.

Résistance post-attachement : capacité d'une variété cultivée à empêcher la formation du suçoir malgré la fixation d'une plante parasite sur ses racines.

Résistance pré-attachement : capacité d'une variété cultivée à empêcher la fixation d'une plante parasite sur ses racines.

Strigolactone : groupe de composés chimiques produits par les racines d'une plante, classifiés comme hormones végétales ou phytohormones. Il est responsable de la germination d'organismes parasites qui se développent dans les racines de la plante hôte telles que les plantes du genre *Striga*.

Système de culture : sous ensemble de système de production, défini pour une surface de terrain donnée, traitée de manière homogène, par les cultures avec leur ordre de succession et les itinéraires techniques.

Tolérance : capacité d'une variété cultivée à se développer malgré la présence de *Striga* bien que celui-ci ait réussi à se fixer sur ses racines.

Traitements expérimentaux : toute combinaison de niveaux ou de modalités de tous les facteurs étudiés.

Liste des annexes

- Annexe 1 :** Test de germination des graines de *Striga asiatica* à l’Africa Rice – Dar es Salam (Tanzanie).
- Annexe 2 :** Effets des exsudats racinaires des plantes sur l’émergence de *Striga asiatica* L. (Kuntze) en milieu contrôlé.
- Annexe 3 :** Fiches variétales des trois variétés de riz pluvial B22, NERICA-9 et NERICA-4.
- Annexe 4 :** Biological control of *Striga asiatica* (Scrophulariaceae) in organic rainfed rice cultivation. (Communication orale)
- Annexe 5 :** Combined effects of cover crops, mulch, zero tillage and resistant varieties on *Striga asiatica* (L.) Kuntze in rice-maize rotation system. Agriculture, Ecosystems and Environment 256, 23-33.

Introduction générale

A Madagascar, la majorité de la population ne mange pas à sa faim ([http 8](#)) ; 30-50 % des Malgaches sont sous alimentés ([http 2](#)). Comme les productions agricoles n'arrivent pas à subvenir aux besoins totaux de la population (Domas et *al.*, 2008), la sécurité alimentaire nécessite un réel défi à relever au niveau national, puisque la nourriture constitue la base fondamentale des besoins humains selon l'échelle de la pyramide de Maslow. Cependant cette sécurité alimentaire, dans les pays en voie de développement comme Madagascar dépend largement de l'utilisation durable des ressources naturelles ([http 3](#)). Cette sécurité se fait menacer à Madagascar surtout dans les régions où l'apparition de la sécheresse est répétitive depuis les années 90, comme le Grand Sud et le Grand Sud-Est de la Grande Île ([http 2](#) ; [http 5](#)) mais cela affecte également les autres régions dans lesquelles la pluviométrie s'avère instable.

Améliorer la gestion des cultures par la combinaison de l'agriculture à la conservation des écosystèmes, permettrait de mieux gérer durablement les ressources naturelles qui sont généralement le patrimoine sol et son écosystème. En améliorant les potentialités du sol, les services des écosystèmes contribuent fortement à la réduction de l'insécurité alimentaire. Malheureusement, les sols sont fortement menacés par différentes pressions humaines : la déforestation, la conversion des zones humides en terrain de culture ([http 3](#)). Ceux-ci se rajoutent aux multiples facteurs de causes de l'insuffisance de la production alimentaire dans les zones d'exploitations agricoles, tels que les catastrophes naturelles (sécheresse, inondations, cyclones, invasions de sauterelles), la pauvreté, la croissance démographique élevée, la faible productivité, les politiques économiques inadéquates (Sourisseau, 2016). Pour Madagascar, l'économie repose principalement sur l'agriculture, la pêche, l'élevage et les activités forestières avec la participation de 70 % de la population active. Malgré cela, l'insécurité alimentaire et la pauvreté continuent de sévir dans l'île. Le pays est encore contraint d'importer 150 000 à 300 000 tonnes de riz par an pour assurer les besoins alimentaires et le cours du riz ne cesse d'augmenter sur le marché mondial ([http 12](#)).

Augmenter la production agricole nécessite souvent un élargissement des surfaces cultivées. Cependant, Madagascar a un relief complexe et varié ; sur les Hautes Terres, le relief est cloisonné en multiples dépressions allongées et cuvettes séparées par des chaînons granitiques (Bastitini, 1996). Dans cette zone centrale, la riziculture irriguée en bas-fond est la principale activité agricole. Face à de nombreux facteurs, en particulier la croissance démographique qui a augmenté de cinq fois depuis les années 60 (Sourisseau et *al.*, 2016), l'accès aux terres et particulièrement aux rizières de bas-fond devient de plus en plus limité. En effet, la croissance démographique à Madagascar s'élève à 2,8 % par an ([http 1](#)) et en

milieu rural, elle est encore plus élevée. Ainsi, le patrimoine sol est de plus en plus insuffisant de génération en génération. Cela ramène les exploitants à aller vers les surfaces inexploitées qui semblent être encore très vastes (Sourisseau et *al.*, 2016). Par conséquent, sur les collines, le riz pluvial, venant en complément des rizicultures aquatiques, conditionnent à la fois la sécurité alimentaire et le développement rural (Penot et *al.*, 2011). Pour le cas du Moyen Ouest du Vakinankaratra, ces milieux sont généralement représentés par les collines destinées au pâturage des ruminants, aux cultures sur brûlis (Région Vakinankaratra, 2011). Désormais, suite aux surexploitations et mauvaises gestions de ces collines, leurs sols sont fragilisés, sensibles à l'érosion, et ont perdu rapidement leur fertilité avec apparition d'indicateurs de dégradation du milieu (Raunet, 2008 ; Sorèze, 2010), notamment *Striga asiatica*.

Striga asiatica est une plante hémiparasite épirhyze des graminées (riz, maïs, sorgho, mil). Cette plante se développe et présente une forte pression sur des sols dégradés, susceptibles à l'érosion, pauvres en matières organiques et à culture continue de sa plante hôte (Oswald, 2005) avec une réduction de la période de jachère. En revanche, sa prolifération et sa persistance dans la région du Moyen Ouest du Vakinankaratra semble être compréhensible vu que toutes les conditions qui lui sont favorables y sont réunies. Généralement, la présence de *S. asiatica* dans le champ d'un agriculteur entraîne des pertes de la production et du rendement de la céréale cultivée allant de 10 à 80 % selon le degré d'infestation (Andrianaivo et *al.*, 1998). Ainsi, les paysans découragés seraient contraints à retourner en jachère ou à abandonner leurs cultures de riz ou de maïs, principales plantes hôtes de *S. asiatica* (Husson et *al.*, 2008). L'introduction de l'agroécologie, particulièrement de nombreux systèmes de semis direct sur couverture végétale (SCV), dans cette zone depuis les années 90 par l'utilisation d'un simple paillage et/ou d'une association avec une légumineuse vivrière (niébé, dolique, soja, etc.) ou avec une légumineuse pérenne (*Arachis pintoï* ou *Stylosanthes guianensis*), semble avoir un impact positif sur la réduction de l'infestation par *S. asiatica* avec une amélioration notable des rendements du riz (Husson et *al.*, 2008).

Dans cette étude, nous supposons que, le milieu a un impact sur la croissance et le développement de *S. asiatica*. Ainsi, modifier l'écologie favorable à sa prolifération réduirait non seulement l'infestation de *S. asiatica*, mais aussi l'impact négatif du parasitisme sur les plantes hôtes (riz et maïs). Pour adapter cette hypothèse à l'étude de la gestion de *S. asiatica*, cette présente étude cherche à répondre à ces trois principales questions focalisées sur i) quels systèmes de culture sont les mieux adaptés dans le Moyen Ouest pour lutter contre l'infestation par *S. asiatica*, l'agriculture de conservation ou l'agriculture conventionnelle ? ii)

quels sont les effets induits par les variétés de riz améliorées et les plantes de couverture dans les associations culturales ? et enfin iii) quels sont les facteurs responsables de ce contrôle ?

L'objectif général de cette étude est ainsi de contribuer à la gestion intégrée de *S. asiatica* en agriculture du Moyen Ouest de Madagascar tout en améliorant les conditions favorables à la productivité agricole. Cet objectif repose sur la compréhension des effets du milieu (plante de couverture, paillages) sur la plante *S. asiatica* notamment son émergence au champ et en milieu contrôlé ainsi que sa germination. L'objectif spécifique se concentre sur l'action des différents facteurs du milieu physique sur *S. asiatica*. Pour cela, les deux facteurs mis en jeu sont principalement :

- le changement des variétés des plantes hôtes en utilisant des plantes tolérantes ou résistantes à l'infestation de *S. asiatica*. Cette pratique permettrait d'améliorer l'efficacité de la lutte contre l'infestation de *S. asiatica*.
- l'utilisation des systèmes de culture du modèle de l'agriculture de conservation avec l'association des plantes dites de service.

Ce présent manuscrit est divisé en quatre chapitres, allant d'une étude générale à une étude spécifique. Une introduction générale débute ces différents chapitres et à la fin se trouve une conclusion générale avec les perspectives. Le premier chapitre intitulé « Contexte de l'étude et synthèse bibliographique », est suivi du 2nd chapitre « Effets des systèmes de culture et des variétés de riz sur l'infestation de *Striga asiatica* (L.) Kuntze dans des rotations culturales riz-maïs ». Ensuite, le 3^{ème} chapitre parle des « Effets des systèmes de culture et des variétés de riz sur les performances des cultures en rotation ». Enfin, le 4^{ème} et dernier chapitre sur l'« Effet des paillages sur l'émergence de *Striga asiatica* (L.) Kuntze en champ inoculé » clôture les composantes de cette étude.

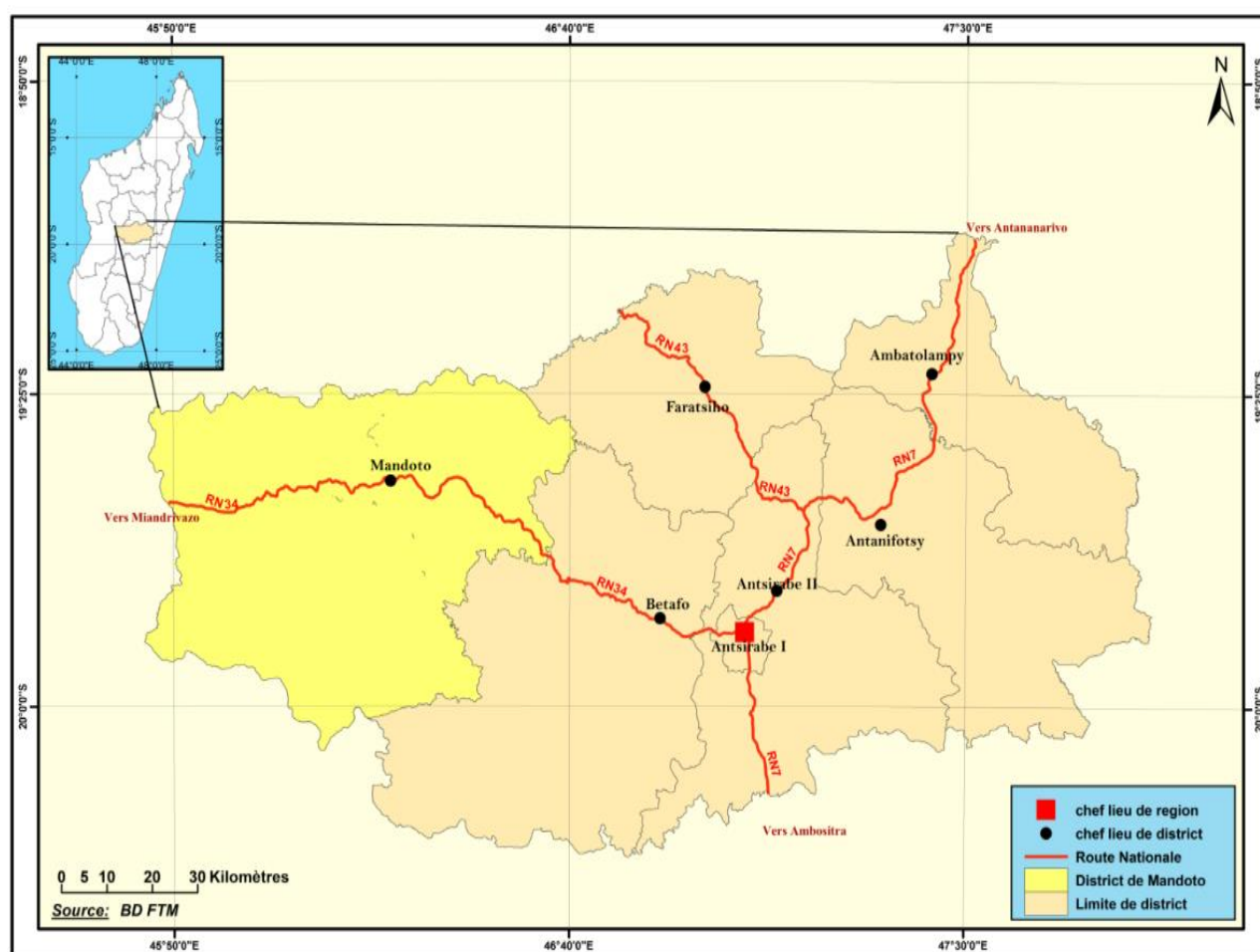
Chapitre 1 : Contexte de l'étude et synthèse bibliographique

I-1. Zone d'étude : le Moyen Ouest du Vakinankaratra et ses contraintes

I-1.1. Milieu naturel ou physique

I-1.1.1 Localisation géographique

Le Moyen Ouest du Vakinankaratra est localisé au centre de Madagascar. Il est situé entre 19°25' et 20°00' de latitude Sud et 45°50' et 46°40' de longitude Est (Figure 1).



I-1.1.2. Localisation administrative

Sur le plan administratif, la zone du Moyen Ouest du Vakinankaratra se trouve dans le district de Mandoto. Elle est limitée par les districts de Miandrivazo à l'Ouest (Région Menabe), d'Ambatofinandrahana au Sud (Région Amoron'i Mania), de Betafo à l'Est (Région Vakinankaratra), de Tsiroanomandidy (Région du Bongolava) et de Soavinandriana

(Région Itasy) au Nord. Une grande partie des surfaces non cultivées du Vakinankaratra se trouve dans le district de Mandoto (79 593 ha).

L'étude a été réalisée dans le Moyen Ouest du Vakinankaratra sur un site expérimental d'Ivory, le fokontany de la commune rurale de Vinany, du district de Mandoto de la région du Vakinankaratra. Ivory se trouve à 87 km au Nord-Ouest de la ville d'Antsirabe (Raunet, 2008, Région Vakinankaratra 2011).

I-1.1.3. Géomorphologie

Le relief du Moyen Ouest est constitué essentiellement des grandes surfaces d'aplanissement appelées pénéplaines généralement herbeuses. Ces dernières sont marquées par la présence des collines (pente de 2 à 5%), souvent découpées par des bas-fonds en forme de lobe et généralement traversées par des réseaux hydriques très denses, sur une altitude comprise entre 800 et 1 300 mètres (Raunet, 2008). Les sols sont rouges à rouges sombres, profonds, de type ferrallitique de 2 à 3 m d'épaisseur ; ils sont relativement pauvres en silice, mais riches en hydroxydes de fer et d'aluminium (Queinnec, 2013). Ces sols sont caractérisés par une teneur élevée en argile peu gonflante du type kaolinite, un complexe argilo-humique moyennement à faiblement désaturé ($V=30\%$ à 60%), avec un pH autour de 5 à 5,5 en surface. L'activité biologique est dominée par les fourmis et termites. Le taux de matières organiques varie entre 2 à 3 % et ce potentiel de fertilité reste encore intact sur les vastes surfaces non encore exploitées de cette région (Raunet, 2008). Néanmoins, ces sols sont fragiles et sensibles à l'érosion dès lors qu'ils sont mis en culture, notamment quand les pentes s'accroissent et sont pauvres en phosphore assimilable. Ainsi, ils nécessitent une bonne conservation physique à travers l'agroécologie. Cette conservation se fait par l'utilisation de l'association des plantes de couverture aux cultures principales et un redressement de la fertilité, soit par un apport progressif, soit par un apport massif à la première année.

I-1.1.4. Climat et végétation

Le Moyen Ouest du Vakinankaratra est marqué par un climat de transition entre le climat des Hautes Terres et celui de l'Ouest Malgache (Région du Vakinankaratra, 2011). Il est marqué par une saison sèche et froide de mai à septembre d'une part, et d'une saison humide et chaude d'octobre à avril, durant laquelle les pluies sont intenses. L'été est plus chaud (en moyenne 25°C , avec un maximum de 31°C et un minimum de 18°C) et l'hiver moins rigoureux (en moyenne 21°C , avec un maximum de 29°C et un minimum de 13°C). La moyenne des précipitations annuelles est de l'ordre de 1 200 mm.

La végétation est une prairie graminéenne avec quelques lambeaux de forêts ripicoles dans les vallons et les « lavaka ». Elle est caractérisée par une formation pseudo-steppique due à la fréquence des feux de brousse. Cette savane herbeuse est dominée par *Aristida sp*, indicateur d'une dégradation avancée du milieu. Celle-ci aboutit à l'apparition des « bad lands » dans certaines localités (Région du Vakinankaratra, 2011). Le paysage agricole est marqué surtout par une vue panoramique de rizières en forme d'amphithéâtre dans les vallons (Photo 1).



Photo 1 : Paysage panoramique de rizière du Moyen Ouest du Vakinankaratra

I-1.2. Milieu socio-économique

I-1.2.1. Population

Le territoire comprend environ 239 023 habitants en 2006 sur une surface de 79593 ha soit 3 habitants par hectare (Région Vakinankaratra, 2011). Avec une densité correspondant à 300 habitants.km², la croissance démographique annuelle moyenne est de 2,63 % et le taux de natalité est de 3,21 % en 2011. Le Moyen Ouest est une zone de migration, la population est composée d'un assemblage social différencié : Merina, Vakinankaratra, Betsileo, Bara et Antandroy. Chacun d'entre eux a ses propres pratiques socioculturelles et économiques. Les trois premières sont agro-éleveurs, tandis que les deux dernières sont éleveurs uniquement. Les éleveurs occupent généralement les vastes pâturages des communes rurales de Vasiana et d'Anjoma Ramartina, qui ont par conséquent une très faible densité démographique.

I-1.2.2. Activités agricoles : Système de production et système de culture

« L'agriculture constitue la principale activité à laquelle s'associent le plus souvent de petites exploitations principalement orientées vers l'autosubsistance. Elle fournit la principale

source de revenu de la population rurale qui consacre 70% pour les dépenses alimentaires » (http 10).

I-1.2.2.1 Systèmes de production

Un système de production agricole est la représentation qui s'approche de la réalité dont on dispose sur la manière de penser et de décider des agriculteurs. Il doit faire face à un enjeu majeur : la notion de durabilité des systèmes d'exploitation. Pour le cas de cette zone d'étude, leurs pratiques s'avèrent inappropriées vu l'abandon de la culture du riz pluvial, dans certains cas, à cause de la pression de *S. asiatica* (Sorèze, 2010). Pour une exploitation, il se définit par la combinaison (la nature et les proportions) de ses activités productives et de ses moyens de production (Mazoyer, 1997).

Au Moyen Ouest, comme pour la plupart de la population malgache, la majorité de sa population se trouve dans le secteur primaire (80%) et l'agriculture vivrière y prédomine. Les principales cultures vivrières existantes dans cette zone sont le riz (irrigué et pluvial), le maïs, le haricot, le soja, le pois de terre et l'arachide. Les cultures fruitières sont l'ananas, le manguier, la canne à sucre, l'oranger, le bananier, le caféier, et l'avocatier. Les cultures maraîchères sont la tomate, la pomme de terre, l'oignon et les légumes à feuille (Région du Vakinankaratra, 2011).

La répartition des exploitations est en fonction de la topographie du milieu. Il existe selon Sorèze (2010) quatre types de milieu de culture : les sommets de *tanety*, les pentes des *tanety*, les bas des *tanety* et enfin les bas-fonds ou rizières. Chaque milieu représente une caractéristique de culture. Les bas-fonds sont spécifiques aux rizicultures inondées ; les bas des collines ou *kidona* appelés aussi *baiboho* sont dédiés aux cultures de légumineuses (arachides, haricots et pois de terre) et aussi du manioc ; les pentes des collines sont généralement moins exploitées, elles sont uniquement utilisées pour la culture du manioc et du pois de terre ; quant aux sommitaux des collines, toutes cultures pluviales peuvent y être pratiquées.

En ce qui concerne l'élevage dans les exploitations, les bovins y sont toujours présents pour la traction animale, la capitalisation, la production de fumier... même si le déficit fourrager reste une contrainte généralisée en saison sèche.

I-1.2.2.2 Systèmes de culture

Sebillote (1990) définit un système de culture comme « l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles cultivées de manière identique. Chaque système

se définit par i) la nature des cultures et leur ordre de succession, ii) les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures, ce qui inclut le choix des variétés ».

Généralement, les systèmes de culture sont basés sur l'agriculture traditionnelle. Le travail du sol (manuel et/ou mécanique) est courant pour toutes les cultures. Cependant, il existe d'autres alternatives telles que la pratique du semis direct sur couverture végétale (SCV) communément appelé agriculture de conservation chez des paysans bénéficiant d'appuis techniques au sein des associations agricoles. Toutefois, la diversification des cultures peut être rencontrée dans les parcelles des paysans. C'est au niveau des plateaux sommitaux qu'elle est la plus développée ; ce sont souvent des légumineuses (par exemple de l'arachide) associées aux cultures de maïs ou de manioc.

I-2. Etat de l'art

I-2.1. Striga asiatica

Le mot « *Striga* » est d'origine latine signifiant « sorcière » (Raynal-Roque et Sallé, 1987). Cette dénomination fut attribuée à la plante à cause de son effet destructif aux cultures. Dans les régions francophones, certaines l'appellent « plante vampire » d'autres « herbe sorcière », ou encore « herbe du diable ». Chez les anglophones, il est nommé « witchweed », signifiant également herbe sorcière, ou « cane killing weeds » ou herbe meurtrière de la canne à sucre. A Madagascar, son nom varie selon les régions : « Angamay » signifiant maladie vénérienne, qui brûle (Andrianaivo et Razafindramamba, 1993), « voninkazoArema » à cause de la couleur rouge de ses fleurs (Arema : est un parti politique malagasy, ayant comme couleur le rouge). Enfin, dans la région du Moyen Ouest les paysans le nomment également « Arema » ou « *Striga* » tout simplement.

En agronomie, *Striga asiatica* est considéré comme une « mauvaise herbe ». Cette dernière se définit de toute plante qui croît dans les parcelles cultivées sans y avoir été intentionnellement plantée (Mémento de l'agronome, 2002). Certes, *Striga asiatica* est une plante nuisible pour l'agriculture.

En physiologie végétale, *Striga asiatica* est désigné « parasite », car c'est une plante qui vit et se nourrit aux dépens des plantes cultivées » (Calvet, 1980).

I-2.1.1. Biologie et écologie

Il existe une quarantaine d'espèces de *Striga* (Raynal, 1991), mais trois d'entre elles causent les dégâts les plus importants : *S. hermonthica* (Del) Benth et *S. asiatica* (L) Kuntze, sur les céréales, et *S. gesnerioides* (Wild) Vatke sur le niébé (Sallé, 1986 ; Parker, 2009). A

Madagascar, seule l'espèce *S. asiatica* est dominante et répandue dans l'ensemble de l'Île (Andrianaivo, 1991). C'est une plante héli parasite épirhyze des graminées (Sallé, 1986 ; Rodenburg, 2010), particulièrement des plantes C4 y compris les céréales (Cochrane, 1997). Elle se développe surtout sur les cultures importantes telles que le riz (*Oryza sativa* L.), le maïs (*Zea mays* L.), le sorgho (*Sorghum bicolor* L.), le millet (*Pennisetum glaucum* L.) et la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.) en zone tropicale semi-aride (Osman et al, 1991). Cette espèce appartient à la famille des Orobanchaceae, et provoque des pertes considérables de rendement (Parker, 1984 ; Gressel and Joel, 2013).

I-2.1.1.1. Systématique

Règne : PLANTAE

Embranchement : PHANEROGAMES

Sous-embranchement : ANGIOSPERME

Classe : DICOTYLEDONES

Ordre : LAMIALES

Famille : OROBANCHACEAE

Genre : *Striga*

Espèce : *asiatica* Kuntze



Photo 2 : *Striga asiatica*
Source : Randrianjafizanaka

I-2.1.1.2. Caractéristiques botaniques

Striga asiatica (L) Kuntze est une plante à fleurs (Photo 2, 3 et 4). Elle se présente généralement sous forme de petite plante herbacée (Figure 2), à port grêle, dressée et raide, annuelle et parfois pérenne ou vivace selon la longévité de son hôte.

Selon Andrianaivo et *al.* (1998), l'axe est généralement ramifié, disposé en chandelier, pouvant atteindre 7 à 30 cm de haut. La plante est fixée à une racine de son hôte. Les racines sont fines et se développent le long de la partie souterraine de la tige. La tige est cylindrique à anguleuse, couverte de poils courts et raides donnant un aspect scabre. Elle est de couleur verte sombre à brun. Les feuilles sont simples, opposées et sessiles. Le limbe est linéaire, parfois lancéolé, long de 6 à 37 mm et large de 1 à 4 mm. Le sommet est en coin aigu parfois obtus. La marge est entière. L'ensemble de la feuille est scabre de couleur verte. L'inflorescence est formée d'un épi terminal, ayant 10 à 15 cm de long. Les fleurs sont solitaires sessiles, à l'aisselle d'une bractée foliacée linéaire de 8 mm de long, scabre. Les fleurs sont de couleur rouge vif. La variété *lutea* est de couleur jaune et la variété *albiflora* de

couleur blanche. Le calice est tubulaire, long de 5 à 7 mm à 5 lobes aigus mais présentant plus de nervures que de lobes (en général 10). Les nervures et les dents sont scabres. La corolle est constituée d'un tube de 6 à 12 mm de long, finement pubescent, coudé bien au-dessus des dents du calice, puis s'ouvrant en 2 lèvres. La lèvre supérieure est faiblement bilobée ou seulement émarginée, de 2 mm de long, à lobes arrondis. La lèvre inférieure est profondément trilobée, de 2,3 mm de long, à lobes oblongs à obovales, avec 4 étamines et un ovaire supère ovoïde. Le fruit est constitué de capsule ellipsoïde, de 3,5 mm de long, de couleur noire, s'ouvre en 2 valves, qui contiennent de très nombreuses graines. Les graines (Photo 3) sont minuscules (150 à 200 μm x 300 à 400 μm), légères (inférieur à 7 μg), ellipsoïdes au tégument ridé et produites en très grands nombres (10 000 à 50 000 par hampe florale), sous la forme d'une poussière brunâtre (Sallé, 1986). Elles sont incapables de germer à la fin de la saison durant laquelle elles ont été produites, elles entrent en dormance. Toutes ces caractéristiques sont décrites dans la figure 2.

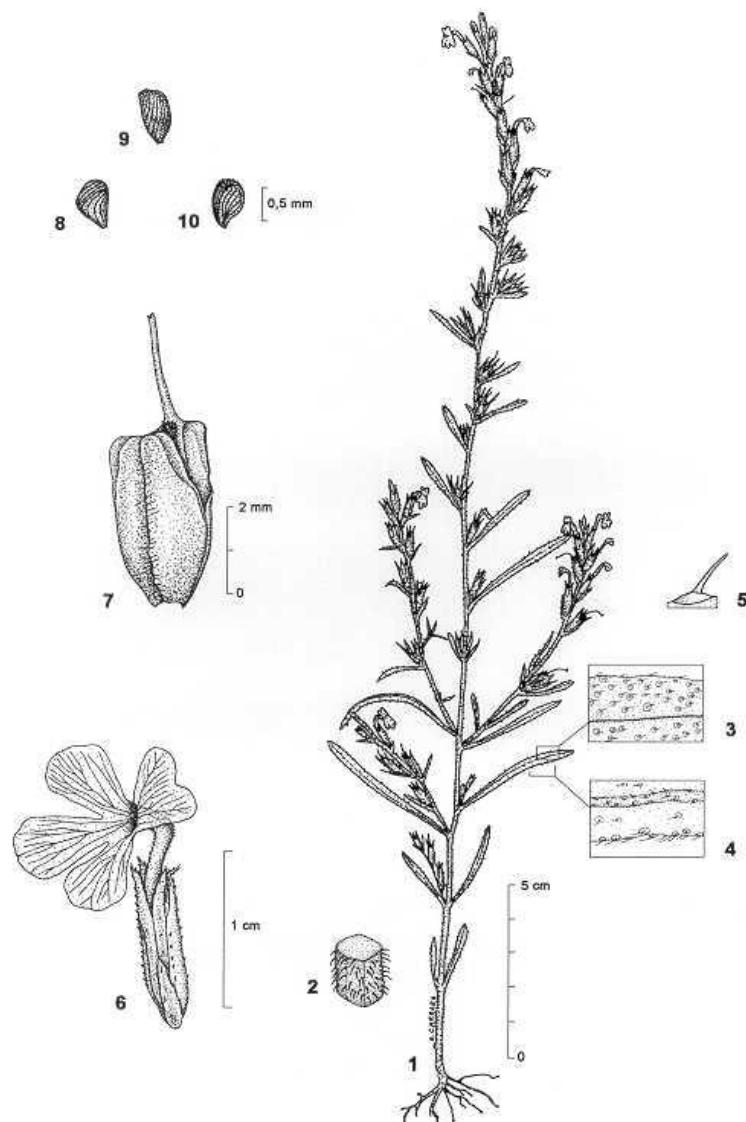


Figure 2 : Dessin botanique de *Striga asiatica*

Source : [http 7](http://7)



Randrianjafizanaka ©

(a) Tiges souterraines



Andrianaivo ©

(b) Jeunes plantes



Blanchard ©

(c) Feuille linéaire



Le Bourgeois ©

(d) Inflorescence en épi



Blanchard ©

(e) Vue générale



Lebreton ©

(f) Fleur avec une lèvre ventrale trilobée avec une dorsale bilobée



Le Bourgeois ©

(g) Jeunes fruits

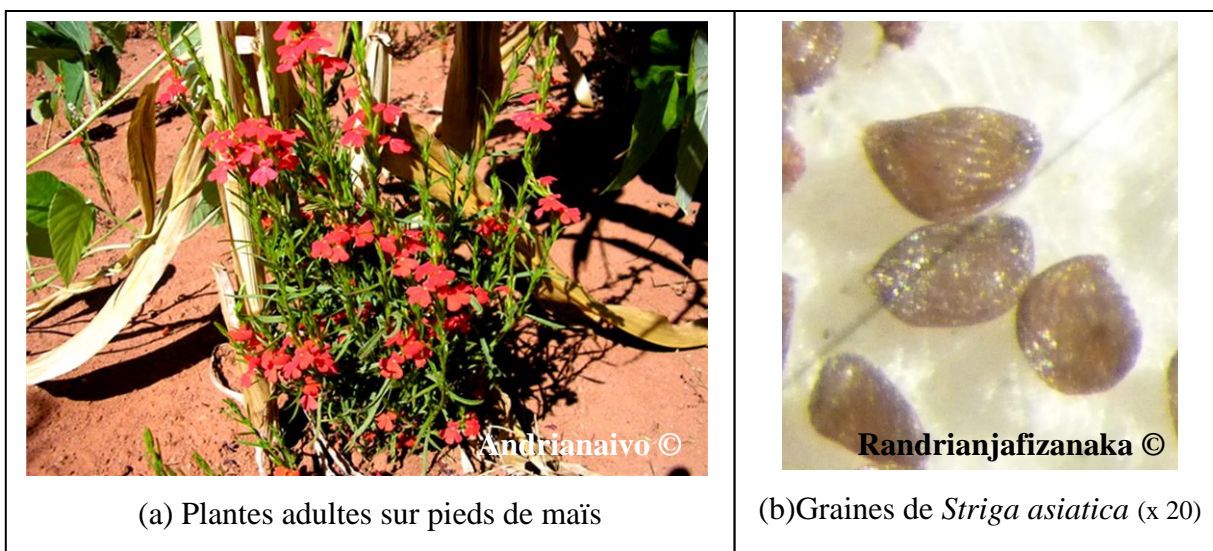


Blanchard ©

(h) Fruits en maturité

Photos 3 : Planche 1-tiges, feuilles, fleurs et fruits de *Striga asiatica*

Source : [http 7](http://7)



Photos 4 : (a) *Striga asiatica* adulte et (b) graines de *Striga asiatica*

Source : [http 7](http://7)

I-2.1.1.3. Striga asiatica et son cycle biologique

Lorsqu'une graine de *S. asiatica* est introduite dans un milieu donné, soit par des matériels agricoles (semences contaminées, bêches, bottes, charrues, fumiers, etc.), soit par les eaux de ruissellement ou même par le vent, cette graine attendra les conditions particulières (Voir I-2.1.1.4) pour commencer son cycle de vie. Le cycle biologique de *S. asiatica* (Figure 3) se caractérise par la succession de plusieurs phases de croissance (Joyeux, 2010). Il commence par une i) phase souterraine qui dure près de 50 jours suivie d'un développement aérien (Sallé et Aline Raynal Roques, 1994) dit ii) phase aérienne. Ces deux phases de croissance sont caractérisées par deux modes de nutrition différents :

➤ La phase souterraine : *S. asiatica* dépend entièrement de l'hôte (holoparasitisme ou parasite strict). Cette période est marquée par trois stades bien distincts : la germination, l'attachement et la pénétration (Andrianaivo, 1998). Ces stades présentent des successions de différentes étapes ayant lieu avant l'émergence de *S. asiatica* :

- la maturation des graines et la dormance ;
- le pré conditionnement des graines par la chaleur (30°C), et l'humidité ;
- la stimulation des graines par le strigolactone, émis par les racines de l'hôte ;
- la germination proprement dite ;
- si les conditions du milieu deviennent défavorables, il y a retour à une seconde dormance ;

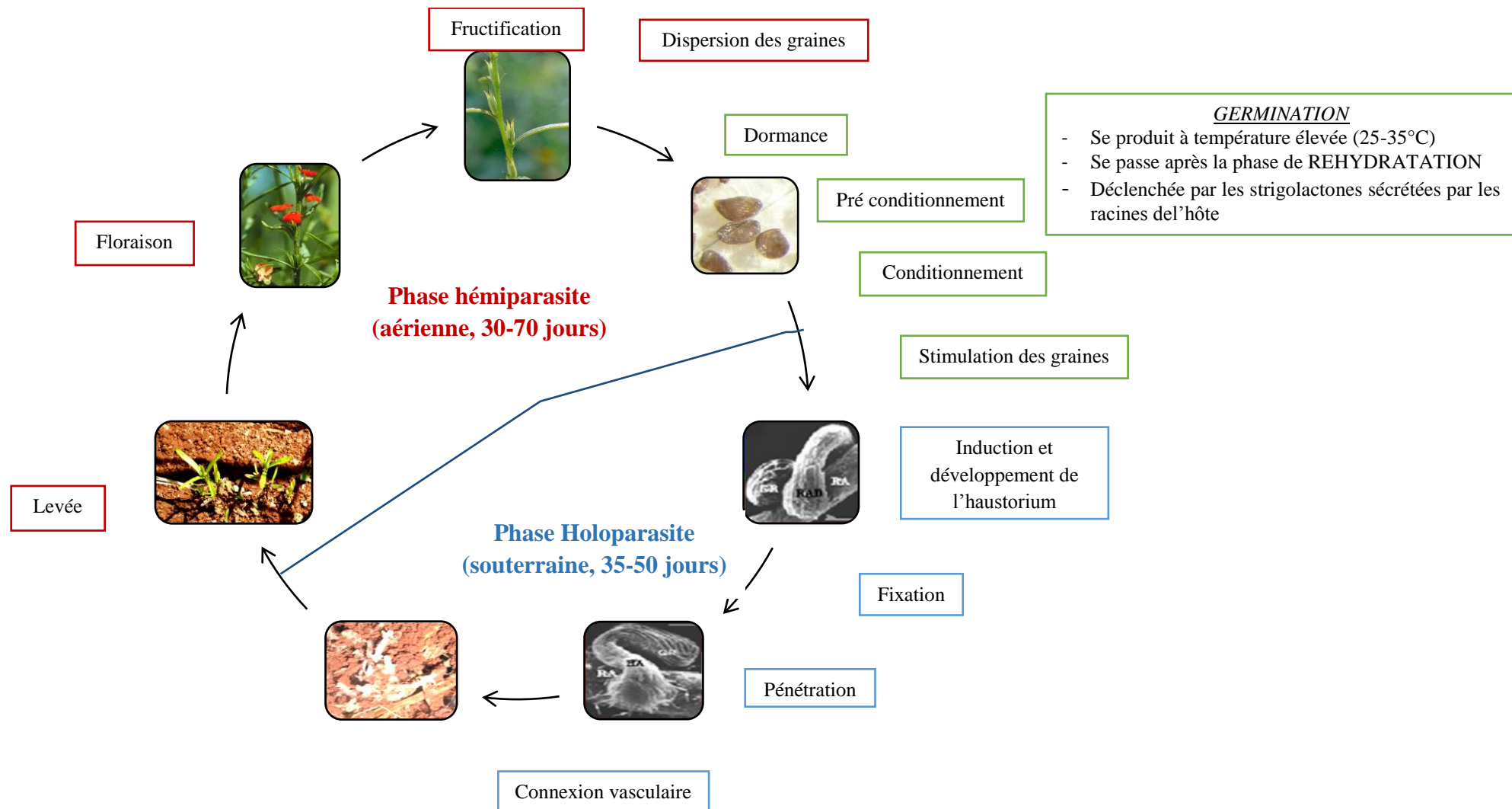


Figure 3 : Cycle biologique de *Striga asiatica*

Source : Thibaut, 2013 ; Olivier, 1995

- si les conditions du milieu restent favorables, il y a sortie de l'haustorium en direction vers la racine de la plante hôte ;
- ensuite, ces évènements sont suivis par la fixation de l'haustorium à la racine de la plante hôte.

Enfin, la jeune plantule de *S. asiatica* développe des ébauches de feuilles pour former une plante entière. Il est à noter que durant cette phase souterraine, *S. asiatica* reste dépendant entièrement de son hôte sur le plan nutritif.

➤ La phase aérienne où *S. asiatica*, tout en étant dépendant de son hôte, assure une partie de sa nutrition (hémiparasitisme) par la photosynthèse. Cette phase comprend l'émergence du jeune plant, la floraison et la fructification, ainsi que la dissémination des graines.

A l'émergence de *S. asiatica* à la surface du sol, la jeune plantule entre dans sa phase aérienne pour assurer sa pérennité dans le temps par la production de semences. Ces phénomènes se succèdent jusqu'à la fin de son cycle :

- la croissance de la tige
- la floraison et la formation des capsules
- la maturation des graines
- la sénescence ou la mort de la plante

I-2.1.1.4. Ecologie : *Striga asiatica* et la fertilité du sol

Striga asiatica est endémique des zones arides ou semi-arides des régions tropicales (Andrianaivo, 1991) et plus particulièrement en Afrique sub saharienne (Oswald, 2005) (Figure 4). Il se développe dans les zones à faible pluviométrie (inférieure à 1 500 mm par an) avec une longue saison sèche et des températures annuelles élevées (Joyeux, 2010). Le plus souvent, *S. asiatica* est favorable sur des sols de faible teneur en matières organiques ou de faible fertilité (Sallé et Raynal-Roques, 1989 ; Oswald, 2005 ; Ayongwa, 2011) et de texture grossière favorable au stress hydrique (Calvet, 1980). Dans ces conditions, il se rencontre surtout, dans les parcelles où l'agriculteur apporte un faible amendement. Généralement, la sévérité de l'infestation se fait aussi remarquer lorsque l'apport en éléments minéraux est faible en particulier l'azote et le phosphore (Rodenburg et *al.*, 2010), c'est-à-dire, les éléments majeurs nécessaires pour la croissance d'une plante, sans pour autant négliger les autres éléments minéraux mineurs. En effet, la germination de cette plante parasite est induite par le strigolactone (Yoneyama et *al.*, 2010), une substance synthétisée par les racines des plantes hôtes lorsque l'azote et le phosphore sont déficients dans le milieu (Yoneyama et *al.*, 2007a).

Ainsi, les dégâts dans les parcelles à restitution en amendement élevé ou sol plus riche y sont moins importants que ceux dans le cas contraire.

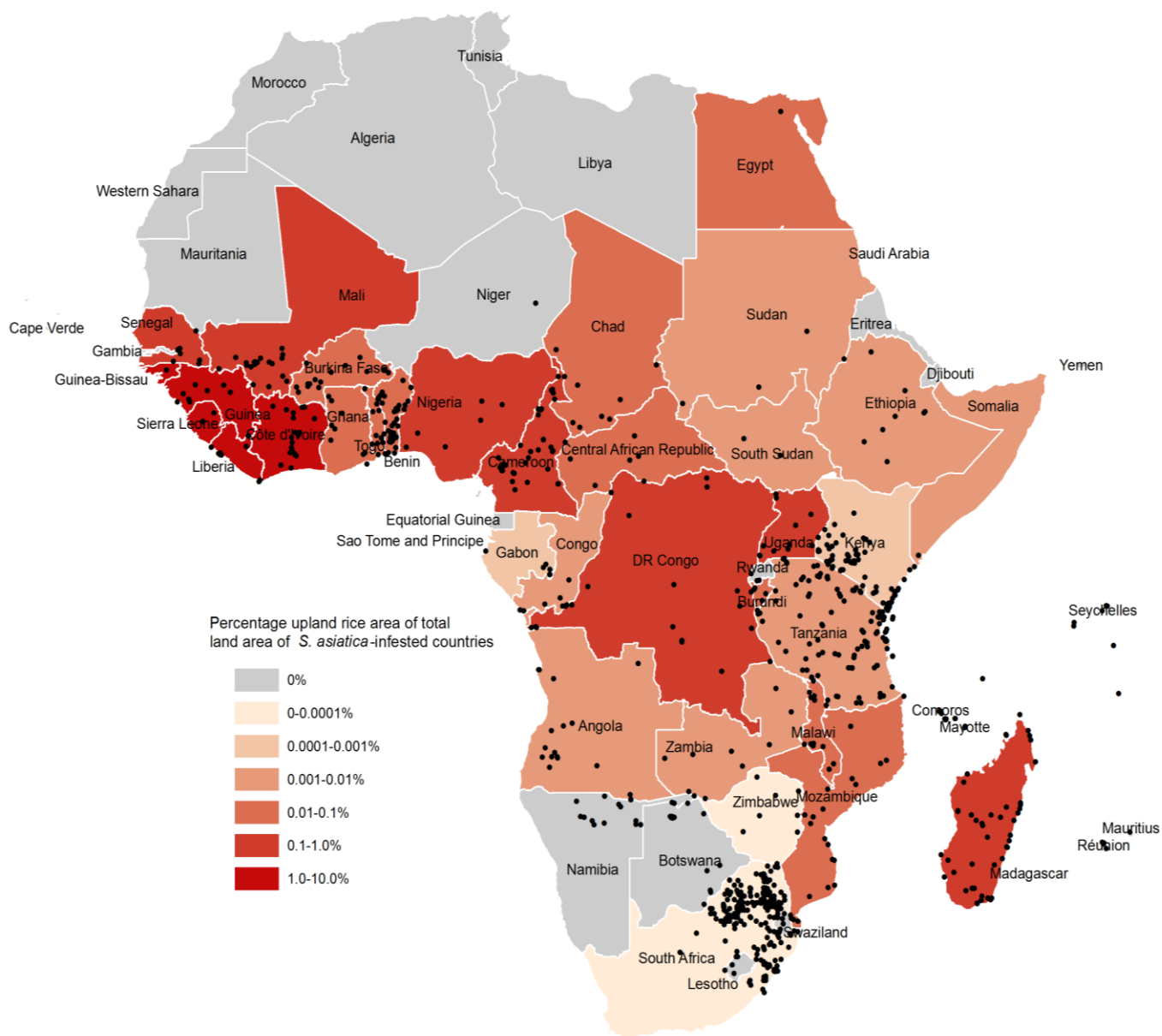


Figure 4 : Répartition de *Striga asiatica* en Afrique Subsaharienne

Source : Rodenburg, 2014

I-2.1.2. Impacts sur les plantes hôtes

A l'échelle mondiale, l'impact des dégâts laissés par l'infestation de *S. asiatica* entraîne des grandes pertes à différents niveaux. Sur le plan économique, le déficit a été estimé à plus de 7 milliards de dollars dans les zones touchées en Afrique, étendues sur une surface d'environ 50 millions d'hectares (Parker, 2009) dont les pertes des rendements en grains peuvent atteindre jusqu'à 100% (Midega et al, 2013). Avec cette énorme superficie, des

baisses considérables des rendements en céréales se font remarquer, ce qui dépend du niveau de la résistance ou de la tolérance de la plante hôte au parasitisme et également du niveau de la fertilité du sol (Ayongwa, 2011) : ces pertes varient de 10 à 100 %, selon le degré de l'infestation dans les parcelles (Lagoke et *al.*, 1991). Les attaques de *S. asiatica*, avant la mort totale des plantes parasitées, se manifestent par l'apparition de tâche nécrotique, puis des chloroses, suivies de flétrissement et de dessèchement des feuilles et de la tige, par conséquent un ralentissement de croissance de la partie aérienne de l'hôte (Raynal-Roques, 1994). Cependant, son système racinaire est maintenu en bon état au profit de *S. asiatica* (Sallé et Raynal-Roques, 1989). Plus la densité de *S. asiatica* dans les parcelles est élevée, plus le risque de baisse ou d'absence de la production est importante, ce qui induirait des impacts pour la sécurité alimentaire et l'économie d'une région ou d'une nation et même du monde entier (Sauerborn et *al.*, 2006).

Entre l'envergure économique et un pied de *S. asiatica* au champ, existe un enchainement de mécanismes physiologiques déviant les ressources nutritives et l'eau, destinées pour les cultures ou les plantes hôtes, au profit de la plante parasite. Les pertes ou la diminution des rendements sont causées par les compétitions entre les deux antagonistes pour les éléments nutritifs, ainsi qu'à l'émission de substances phytotoxiques affectant la croissance de la plante infestée par *S. asiatica* (Ejeta et *al.*, 1993 ; Press et *al.*, 2001). Le mécanisme de parasitisme de *S. asiatica* débute par la formation de lien entre *S. asiatica* et sa plante hôte (Joel et Gressel, 2013). Cet organe spécifique appelé « haustorium » sert de pont pour transférer l'eau et les éléments nutritifs de l'hôte vers le parasite (Sauerborn et *al.*, 2006 ; Midega et *al.*, 2013). Cette connexion se trouve au niveau de la racine juste après la germination des graines de *S. asiatica*. Plusieurs successions de phénomènes physiologiques ont lieu avant et après la fixation de l'haustorium (Scholes et Press, 2008).

I-2.1.3. Méthodes de lutte

Conscients des dégâts apportés par l'infestation de *S. asiatica*, plusieurs recherches ont été menées pour élaborer des méthodes de lutte contre *S. asiatica*. Cette gestion peut être résumée en deux grandes catégories de lutte : la lutte directe ou curative et la lutte indirecte ou préventive (Sallé et Aber, 1986 ; Oswald, 2005).

a) La méthode de lutte curative englobe les différentes techniques qui détruisent la plante parasite installée au champ avec un effet immédiat d'élimination de *S. asiatica*. Elle peut être physique, chimique, biologique, génétique et agronomique.

- **La lutte physique** ou mécanique consiste à détruire les parties aériennes de *S. asiatica*. Elle s'applique à travers l'arrachage manuel et le sarclage pendant les périodes de désherbage

ainsi que le brûlage des ces plantes. L'avantage de cette pratique est la réduction de concurrence nutritionnelle entre hôte et parasite à une certaine période de leur développement. Toutefois, cette méthode est limitée en cas d'une infestation majeure et de la surface des parcelles, mais surtout de la production de semences par *S. asiatica*. Cette lutte serait efficace lorsqu'elle est pratiquée avant la floraison, lors d'infestations légères.

- **La lutte chimique** est toujours un moyen de détruire les parties aériennes de *S. asiatica* par l'utilisation d'herbicide avant ou après son émergence (Thalouarn et Fer, 1993) ou de stimulants de la germination des graines de *Striga sp.* (Sallé et Aber, 1986) comme éthylène et strigolactone. Parmi les herbicides, ceux déjà testés dans les recherches en post levée sont le 2,4 D (Hoffman et *al.*, 1997), le glyphosate et l'imidazolinone-resistant (IR) (Ramson et *al.*, 2012). Les résultats obtenus, au niveau de la densité de *S. asiatica* au champ ainsi que la production des céréales, sont similaires à ceux employés dans la lutte chimique d'après les études faites par Hoffman et *al.* (1997). Cependant, la phytotoxicité de l'herbicide envers la culture reste un problème difficile à maîtriser en raison de l'intimité de la relation entre *S. asiatica* et la culture (Olivier, 1995). De plus, les coûts des herbicides ne sont pas souvent à la portée de la majorité des paysans concernés (Olivier, 1995). Enfin, tout retard de traitement conduit non seulement à une perte des rendements mais aussi à des pertes économiques par le gaspillage d'herbicide ainsi qu'à l'enrichissement du stock en semence de *S. asiatica* dans le sol qui n'a pas été éliminé à temps.

- **La lutte biologique** quant à elle, requiert une maîtrise de *S. asiatica* par des moyens naturels inoffensifs à l'environnement. Celle-ci a souvent recourt à la biotechnologie (sélection des variétés résistantes), à l'entomologie (insectes phytophages de *S. asiatica*), à la pédologie (fertilisation organique), à la phytopathologie (les champignons nuisibles). Ces deux dernières pratiques utilisent des agents de contrôle biologique ou bio agresseur comme i) les coléoptères du genre: *Smicronyx spp* (Sauerborn et *al.*, 2007) et *Junonia sp*, et ii) les champignons du genre *Fusarium oxysporum* (Elzein et *al.*, 2004).

- **La lutte génétique** consiste à utiliser des variétés résistantes (Kureh et *al.*, 2001 ; Rodenburg, 2005).

- Enfin **la lutte agronomique** regroupe les différents moyens de lutttes précédentes de manière à donner des résultats plus satisfaisants. Elle vise à réaliser une méthode de lutte par la gestion intégrée de la plante parasite. Cette gestion intégrée regroupe la sélection de variétés tolérantes ou résistantes, des méthodes agronomiques, comme la transplantation des plantes hôtes (van Ast et *al.*, 2005), l'association culturale (*push-pull*) et les plantes pièges (Khan et *al.*, 2000 ; Lawane et *al.*, 2009 ; De Groote et *al.*, 2010), et aussi la destruction des

parties aériennes. Dans la majorité des cas des petits exploitants agricoles, l'arrachage des plants de *S. asiatica*, manuel ou à l'aide de petit matériel, est en général, le seul moyen de maîtriser l'infestation de *S. asiatica* au champ. Cette technique ou contrôle mécanique, demande beaucoup de mains d'œuvre.

b) La méthode de lutte préventive consiste à gérer les systèmes de culture et la fertilité du sol afin de créer des conditions défavorables pour *Striga* (Oswald, 2005). Elle se base surtout sur des contrôles à long terme ayant pour but de réduire les stocks en graines de la plante parasite dans le sol. Généralement, quelques pratiques agronomiques interviennent dans cette lutte : la jachère, la rotation culturale, et enfin, les fertilisations organiques et minérales.

I-2.2. Agroécologie

II-2.2.1. Définition et Principes

L'agroécologie est un concept utilisé en agriculture et en agronomie qui, selon l'usage peut désigner a) une discipline scientifique, b) un mouvement social ou c) un ensemble de pratiques agricoles (Wezel, 2009). Elle prend en compte les dimensions multiples de l'agriculture (Perez-Vitoria, 2012). Chaque partie a été définie par Schaller (2013) comme :

- a) Une discipline scientifique, au carrefour de l'agronomie, de l'écologie et des sciences sociales privilégiant les approches systémiques ;
- b) Un mouvement social, en marge d'un courant dominant de modernisation de l'agriculture et promouvant le développement rural, la souveraineté alimentaire et une agriculture respectueuse de l'environnement ;
- c) Un ensemble de pratiques agricoles permettant de concevoir des systèmes de production agricole s'appuyant au maximum sur les fonctionnalités offertes par les écosystèmes, de réduire les pressions sur l'environnement et de préserver les ressources naturelles.

Ce travail de recherche est basé à partir du dernier point. En effet, dans les systèmes de culture, l'agroécologie améliore les fonctions naturelles des écosystèmes, et intensifie ainsi l'activité biologique dans et au-dessus du sol, au bénéfice de l'agriculteur et de la production agricole durable. Ce terme englobe, entre autres, les SCV, l'agriculture biologique, etc. L'objectif de l'agroécologie est d'atteindre un équilibre du dynamisme de l'agroécosystème.

I-2.2.2. Historique de la pratique

Le mot agroécologie a été inventé par Basil Bensin, un agronome américain d'origine russe, en 1928 (Wezel et *al.*, 2009 ; [http 11](#)). A partir des années 1970, l'agroécologie a été considérée comme une **discipline scientifique** ayant des interactions entre l'agronomie,

l'écologie, l'entomologie et même l'ethnobotanique. Puis cette discipline se développa suite à l'effet de la révolution verte, une politique de transformation des agricultures dans les pays "en développement" par des travaux de chercheurs américains. Elle a été définie en cette période, comme l'application de l'écologie à l'agriculture. Dans les années 1980, l'agroécologie a été intégrée par des **mouvements sociaux**, en particulier en Amérique latine et au Brésil ([http 11](#)). A partir des années 1980-90, et en concertation avec le sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992, l'agroécologie acquiert la conception et la gestion d'agroécosystème durable (Wezel et *al.*, 2009 ; [http 11](#)). De nombreuses approches multidisciplinaires se joignent à elle pour étoffer sa définition. A partir des années 2000, elle s'intéresse aussi aux problèmes de l'alimentation sur des relations indissociables à l'agriculture.

Les pratiques agroécologiques se fondent sur l'association de 5 principes, déclinés par Miguel Altieri en 1995 :

- le renouvellement de la biomasse et l'entretien de la fertilité des sols ;
- la minimisation des pertes en énergie solaire, en air et en eau ;
- la diversification génétique dans le temps et l'espace ;
- la valorisation des interactions biologiques ;
- la lutte contre les ennemis des cultures (maladies, ravageurs et adventices).

I-2.3. Agriculture de conservation

Le modèle de l'Agriculture de Conservation (AC) est un ensemble de pratiques nouvellement promu dans les pays en voie de développement. C'est un ensemble de techniques culturales destinées à maintenir et améliorer le potentiel agronomique des sols, tout en conservant une production régulière et performante sur les plans technique et économique. Elle fait partie des techniques utilisées en agroécologie. Cet ensemble de techniques permet une meilleure rentabilité économique à long terme en réduisant le besoin en intrants (engrais, produit phytosanitaire, carburant) sans les interdire. L'agriculture de conservation s'appuie sur trois principes de base : un travail minimum du sol, une couverture permanente du sol et une diversification culturale (Scopel et *al.*, 2012). Cette pratique culturale a différentes appellations selon les nations avec un sens similaire, « système de culture sur couverture végétale » (SCV) en français, « conservation agriculture » en anglais et « plantio directo na palha » en portugais.

I-2.3.1. Avantages

- Intérêts agronomiques :

Les couvertures garantissent le recouvrement permanent du sol et la maîtrise de l'érosion, la restauration et le maintien de la fertilité du sol, et possèdent de multiples fonctions essentielles et complémentaires. Elles assurent une conservation de l'eau et une réduction de l'évaporation, une restauration de la porosité, le recyclage des éléments nutritifs, une activité biologique intense, un contrôle des adventices et une amélioration des rendements.

– Intérêts environnementaux :

Les plantes de couverture contrôlent principalement l'érosion : protection des bassins versants et des aménagements, réduction de l'ensablement de rizières. Leurs implantations permettent de récupérer des sols abandonnés. La présence de ces couverts accroît l'efficacité de l'utilisation des engrais et pesticides, tout en diminuant leur impact polluant et améliorant la qualité des productions. Enfin, elles contribuent à la séquestration du carbone et de l'azote atmosphérique, ainsi à la réduction de l'effet de serre.

– Intérêts sociaux économiques :

Généralement, les systèmes de culture en agriculture de conservation réduisent la durée et la pénibilité du travail ainsi que des coûts correspondants (suppression des labours et des sarclages...), assouplissent les calendriers culturels et amoindrissent la sensibilité des cultures aux aléas climatiques. Par conséquent, la production est sécurisée à travers la diversification des cultures et l'intégration de l'élevage. Les agriculteurs sont par la suite professionnalisés grâce aux techniques accessibles à tous.

I-2.3.2. Limites

Des arguments de blocages à l'initiation des systèmes de culture en agriculture de conservation avancés par les paysans malgaches du Moyen Ouest sont souvent reflétés par les points ci-après :

- coûts élevés des investissements de départ (besoin important d'une main d'œuvre pour l'installation des couvertures en première année de mise en place des cultures) ;
- difficulté à l'accès aux intrants tels que les équipements, les engrais chimiques, les pesticides nécessaires ;
- insuffisance des semences des plantes de couverture.

I-2.4. *Striga asiatica* et agroécologie

I-2.4.1. Différents modes de gestion de *Striga asiatica*

Depuis son apparition, il existe différents moyens de lutte contre les effets néfastes de *S. asiatica*. En partant de la lutte mécanique par le désherbage manuel à la lutte chimique par

l'utilisation des produits chimiques, il est constaté que chacune d'elles n'est pas autant si efficace, pourtant coûteuse (lutte chimique) et épuisante (lutte mécanique).

Le désherbage mécanique consiste à nettoyer les parcelles infestées après l'émergence des plants de *S. asiatica* soit à la main soit à l'aide des petits matériels. Cette méthode est à la fois épuisante et inefficace vu que la sortie en surface de *S. asiatica* n'a pour rôle que d'assurer la pérennité de l'espèce dans le temps.

Le désherbage chimique quant à lui, consiste au recours à l'utilisation d'herbicide. Cependant, celui-ci aussi s'avère inefficace car une fois émergée, cette plante a juste pour mission d'assurer sa reproduction. Tout retard de traitement conduirait non seulement à une perte des rendements mais aussi à des pertes économiques par le gaspillage d'herbicide ainsi qu'à l'enrichissement du stock en semence de *S. asiatica* dans le sol.

I.2.4.3. Utilisation de l'agriculture de conservation pour lutter contre *Striga asiatica*

Conscients des dégâts apportés par l'infestation de *S. asiatica*, différentes méthodes de lutte ont été déjà prises par les acteurs concernés pour le gérer. La maîtrise de *S. asiatica* par l'agriculture de conservation peut se faire de plusieurs manières :

- l'utilisation de plantes allélopathiques (stimulantes ou inhibantes)
- l'utilisation des insectes phytophages de *S. asiatica* (*Junonia sp.*)
- l'utilisation de plantes fausses hôtes ou plantes pièges (légumineuses)
- la modification des systèmes de culture (diversification et rotation culturales)
- la modification de la génétique (variété résistante et/ou tolérante)

Chapitre 2 : Effets des systèmes de
culture et de variétés de riz sur
l'infestation de *Striga asiatica* (L.) Kuntze
dans des rotations culturales riz-maïs

Ce chapitre résume et présente l'article publié dans le journal *Agriculture, Ecosystems and Environment* (Annexe 5).

II.1. Introduction

Le maïs (*Zea mays* L.) et le riz (*Oryza sativa* L et *O. glaberrima* Steud.) sont les deux plus importantes cultures vivrières en Afrique subsaharienne (Shiferaw et *al.*, 2011; Seck et *al.*, 2012). Les variétés de riz adaptées aux sols drainant des Hautes Terres peuvent être cultivées dans des conditions similaires à celles du maïs. Ces deux cultures sont souvent ainsi cultivées par les mêmes agriculteurs, en culture associée ou en rotation (Balasubramanian et *al.*, 2007; Shiferaw et *al.*, 2011). Cependant, ces agriculteurs sont confrontés à un certain nombre de contraintes de production, liées ou se renforçant mutuellement, telles que la sécheresse, la fertilité non optimale du sol et l'infestation de mauvaises herbes (Balasubramanian et *al.*, 2007 ; Cairns et *al.*, 2012). *Striga spp.* sont d'importantes mauvaises herbes pour ces deux cultures (Johnson et *al.*, 1997). Les deux importantes espèces de *Striga* sont i) *S. asiatica* (L.) Kuntze, principalement en Afrique orientale et australe, et ii) *S. hermonthica* (Del.) Benth., en Afrique subsaharienne et au Nord de l'équateur principalement (Mohamed et *al.*, 2001).

L'infestation par *Striga spp.* est l'une des contraintes principales de production biotique du maïs en Afrique (Shiferaw et *al.*, 2011 ; Cairns et *al.*, 2012), avec une incidence estimée à 14% sur l'ensemble du continent (De Groote et *al.*, 2008). Pour le riz, l'importance est généralement moins reconnue (Schut et *al.*, 2015), mais l'incidence moyenne de *Striga spp.* dans le riz a été récemment estimée à 12% (Rodenburg et *al.*, 2016). Les pertes de rendement causées par *Striga* varient de 21 à 74% pour le maïs (De Groote et *al.*, 2008) et de 35 à 80% pour le riz (Rodenburg et *al.*, 2016).

Dans le Moyen Ouest de Madagascar, les rotations de riz et de maïs sur les Hautes Terres sont souvent pratiquées sur des sols peu texturés et peu fertiles, sur des terrains en pente et dans des conditions de précipitations irrégulières, avec des sécheresses alternant les périodes de précipitations intenses (Bruelle et *al.*, 2015). L'érosion des sols par les ruissellements est ainsi fréquente dans cette zone (Dusserre et *al.*, 2012). Cela appauvrit davantage les sols (Smaling et *al.*, 1996) et facilite la dispersion des graines de mauvaises herbes (Burton et *al.*, 2005). *Striga asiatica* est l'une des espèces dominantes de mauvaises

herbes dans ces systèmes de rotation riz-maïs à Madagascar (Geiger et *al.*, 1996). Ceci, n'est pas surprenant en fait, dans la mesure où la présence d'espèces de *Striga* est souvent associée à une faible fertilité des sols et à des précipitations irrégulières (Kamara et *al.*, 2014).

L'une des stratégies possibles pour résoudre les problèmes liés au climat et au sol décrits ci-dessus dans les systèmes de culture de céréales consiste à remplacer la pratique du travail du sol saisonnier et du défrichage, par un système de culture intercalaire sans labour avec une couverture végétale permanente du sol (morte ou vivante), généralement appelée Agriculture de Conservation (Thierfelder et Wall, 2009, 2012). Dans le Moyen Ouest de Vakinankaratra, où la rotation riz-maïs est le système prédominant, les pratiques de l'agriculture de conservation (AC) ont été testées avec des résultats variables, car les avantages et les qualités socioculturels et économiques étaient en retard par rapport aux mérites agronomiques et environnementaux (Sester et *al.*, 2015). Des effets positifs de l'AC ont été rapportés sur la pyriculariose du riz (Sester et *al.*, 2014) et sur les vers blancs, une larve de scarabée vivant dans le sol (Ratnadass et *al.*, 2013). Il n'est pas encore connu si les stratégies proposées de l'AC réduisent également l'infestation par *S. asiatica*, mais des composants individuels se sont avérés efficaces. La culture intercalaire peut réduire l'infestation par *Striga spp.* lorsque l'espèce non-hôte intercalée peut induire la germination des semences du parasite sans soutenir le parasitisme, principe appelé « germination suicide » (Khan et *al.*, 2010). La couverture végétale peut également réduire *Striga spp.* en augmentant l'ombrage et l'humidité et en abaissant les températures (Oswald et *al.*, 2002). Il a été également démontré que le paillage supprime le parasitisme de *Striga spp.* (Midega et *al.*, 2013), probablement en partie grâce à des mécanismes similaires, tandis que le semis direct peut empêcher les semences de *Striga spp.* nouvellement produites de pénétrer dans le sol suffisamment profond pour rencontrer des racines d'hôte appropriées lors des cultures suivantes (van Ast et *al.*, 2005).

Dans la présente étude, les effets d'une combinaison de ces mesures sur *S. asiatica* ont été testés dans un champ de paysan infesté de *S. asiatica* dans la zone de production riz-maïs du Moyen-Ouest de Vakinankaratra. Les pratiques ont été testées avec des variétés de riz présentant des niveaux de résistance différents. L'utilisation de variétés résistantes a été souvent suggérée comme un composant idéal d'une stratégie de gestion intégrée de *Striga spp.* (Yoder et Scholes, 2010), sans pour autant garantir leur capacité à contourner l'adaptation de *S. asiatica* à cette résistance. La pratique culturelle paysanne localement prédominante d'une rotation riz-maïs avec labour saisonnier et élimination des résidus de culture a été considérée comme la référence. Les objectifs étaient i) de trouver des pistes d'amélioration de ce système de culture de rotation riz-maïs pouvant faire profiter les petits

exploitants agricoles, ii) de quantifier les différents effets de variétés de riz, de la gestion des pratiques culturales et de leurs combinaisons sur la lutte contre *S. asiatica* et iii) de discuter des facteurs possibles expliquant ces effets.

II.2. Matériels et méthodes

II.2.1. Site d'étude

Au cours de quatre saisons de culture, de décembre 2011 à avril 2015, une expérimentation factorielle a été menée sur un champ d'un agriculteur situé à Ivory, au Moyen-Ouest du Vakinankaratra. Le champ a été situé à 19° 33' 26' S et à 46° 24' 55' E. L'altitude du site est de 930 m sur une superficie totale de 1 800 m² au départ intégrant les deux composantes de la rotation biennale riz-maïs.

La zone d'étude se caractérise par un climat tropical de moyenne altitude avec deux saisons bien définies : la saison chaude pluvieuse de novembre à avril et la saison sèche et froide de mai à octobre. Les données de température, de rayonnement et de précipitations sont enregistrées quotidiennement par une station météorologique automatique (série ENERCO 404, Cimel, France) à 835 m du dispositif. Au cours de l'expérience (septembre à mai), le rayonnement mensuel moyen variait de 17 à 28 MJm⁻² et les températures de 17,2° C (nuit) à 30,7° C (jour), avec des moyennes mensuelles comprises entre 21 et 25°C et des fluctuations mensuelles similaires au fil des saisons culturales. Les précipitations cumulées au cours de l'expérience ont été de 976 mm pour la saison 1, de 1452 mm pour la saison 2, de 1194 mm pour la saison 3 et de 1814 mm pour la saison 4 (Figure 6). Les précipitations annuelles moyennes à long terme est de 1307 mm.

Le sol est caractérisé par un oxisol limono-argileux (USDA) avec une composition limono-argileuse de 34–39–27% dans les couches supérieures (0–10 cm). Les teneurs en éléments nutritifs et en matière organique du sol sont généralement modérées, avec 17,2g.kg⁻¹ de C, 1,4 g.kg⁻¹ de N (total) et 2,5 mg.kg⁻¹ de P disponible (Olsen). Le pH du sol (H₂O) était au départ de l'expérimentation de 5,3 sur la même profondeur. La teneur en éléments nutritifs du fumier de bovin épandu a été de 0,93% N, 11,9% C, 0,14% P, 0,94% K, 0,50% Ca et 0,20% Mg. Le champ est placé sur une pente modérée (0 à 5%) sur une partie sommitale d'un versant. Des répétitions expérimentales sont disposées le long de ce gradient avec la Répétition 1 en haut de la pente et la Répétition 6 en bas de la pente.

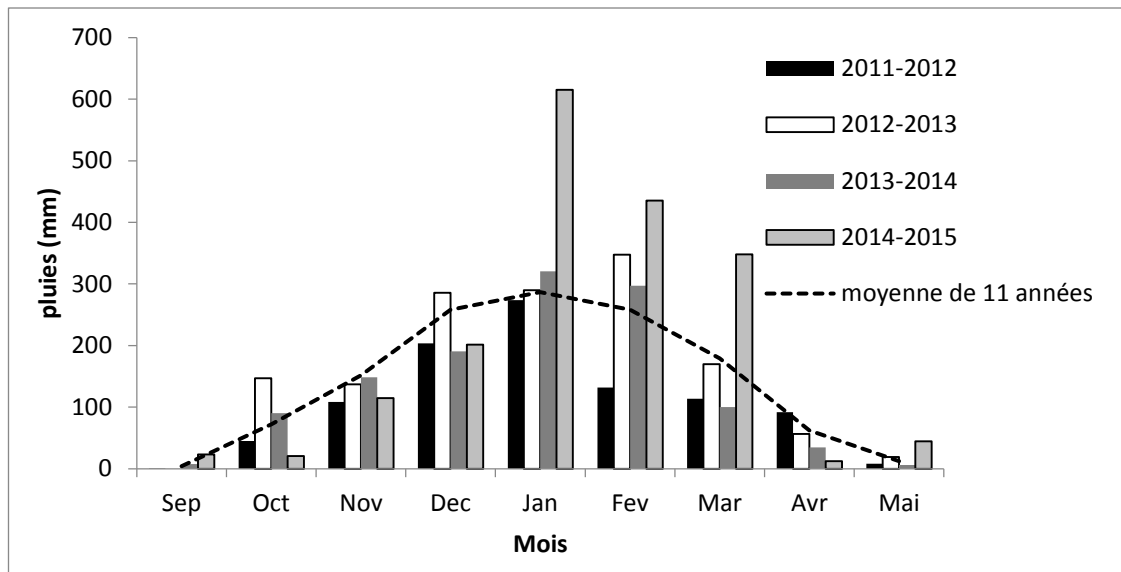


Figure 5 : Précipitations mensuelles (mm) par saison de culture, pendant les quatre saisons de 2011-2012 (S1) à 2014-2015 (S4) et la moyenne sur 11 ans

II.2.2. Traitements expérimentaux et matériel végétal

La pratique culturale paysanne prédominante au niveau local de la rotation riz-maïs avec travail du sol saisonnier et élimination des résidus de culture, désignée désormais par la pratique conventionnelle (CONV), est comparée à trois systèmes de rotation riz-maïs selon les principes de l'agriculture de conservation. Les trois pratiques de l'AC utilisent les systèmes de culture suivants i) culture intercalaire de maïs avec niébé (*Vigna unguiculata* [L.] Walp. Cv David) et *Mucuna* (*Mucuna pruriens* [L.] DC. Cv CTAS MU1) (ACNM), ii) culture intercalaire de maïs avec haricot-riz (*Vigna umbellata* [Thunb.] Ohwi & Ohashi cv. CTAS tsiasisa) (ACHR) et iii) cultures intercalaires de riz et de maïs avec des *Stylosanthes* (*Stylosanthes guianensis* [Aubl.] Sw., cv CIAT 184) (ACST). Les semences de niébé venaient de SdMad (Semis direct de Madagascar) à Ambatondrazaka, celles de *Mucuna* provenaient du CTAS (Centre Technique d'Agroécologie du Sud) à Ambovombe, les graines de haricot-riz ont été obtenues d'un paysan de Fidirana et celle de *Stylosanthes* d'un paysan de Mazoto. Le choix des espèces de couverture est basé sur des principes agronomiques et de contrôle des mauvaises herbes. Pour la lutte contre *S. asiatica* et la conservation des sols, une culture intercalaire appropriée pour ces systèmes de rotation riz-maïs devrait avoir une bonne couverture du sol pendant la culture de maïs, produire suffisamment de biomasse pour le paillage pendant la culture de riz et améliorer également la fertilité du sol. Les espèces de plantes de couverture appropriées pour ces systèmes et ces types de sol, répondant à ce profil, ont été identifiées par Naudin et al. (2015a). Parmi la gamme de plantes identifiées, les trois espèces ou combinaisons d'espèces différentes sélectionnées sont i) les légumineuses

annuelles à cycle court *Vigna unguiculata* (niébé) et *Mucuna pruriens* (*Mucuna*), ii) la légumineuse annuelle à cycle long *Vigna umbellata* (haricot-riz) et iii) la légumineuse vivace *Stylosanthes guianensis* (stylo). Parmi ces espèces, *Mucuna* et niébé ont déjà démontré leur capacité à réduire les problèmes de *Striga spp.* (Oswald et al., 2002; van Mourik et al., 2008 ; Kiwia et al., 2009). En se basant sur des raisons agronomiques (par exemple, la concurrence entre les cultures, la facilité de gestion), Naudin et al. (2015a) ont également recommandé de ne pas intercaler le riz avec les légumineuses annuelles : niébé, *Mucuna* et haricot-riz. Le maïs, en revanche, convient à la culture intercalaire en raison des espaces inter-plantes relativement grandes.

Dans toutes les pratiques culturales de l'AC, le labour du sol s'effectue seulement au début de la première campagne. Dans les campagnes suivantes, tous les résidus de récolte, à l'exception des grains, des panicules et des gousses, sont laissés sur le terrain sous forme de paillis après la récolte et les cultures associées.

Trois variétés de riz pluvial sont comparées simultanément i) la variété de riz brésilienne B22, populaire mais sensible au *Striga asiatica*, et les variétés NERICA (New Rice for Africa), récemment introduites dans la zone d'étude, ii) NERICA-4 et iii) NERICA-9. NERICA-4 est résistante au *S. asiatica*, tandis que NERICA-9 est modérément résistante au *S. asiatica* (Rodenburg et al., 2015). Les variétés NERICA sont issues de croisements interspécifiques entre les espèces de riz asiatiques *Oryza sativa* L. et africaine, *Oryza glaberrima* Steud. (Jones et al., 1997). Les semences de riz (B22 et NERICA) sont issues du CIRAD. Pour le maïs, l'IRAT 200 est la variété utilisée dans cette étude, une variété disponible dans le commerce mais sensible au *S. asiatica*. Il provenait d'Ambatolahy, un village voisin (19° 34'37 "S – 46° 26'37" E).

II.2.3. Dispositif expérimental

L'expérimentation (Photo 5) est conçue selon un dispositif de *split-plot* (Figure 6 et 7), avec des pratiques culturales assignées de manière aléatoire aux parcelles principales et des variétés de riz attribuées de manière aléatoire aux sous-parcelles, le tout en six répétitions (Figure 6). La variété de riz testée étant utilisée comme un facteur de sous-traitement, on étudie aussi ses arrières effets potentiels à la résistance au *S. asiatica* même pendant les campagnes culturales avec le maïs. Afin d'étudier chaque année les principales cultures de cette rotation, les parcelles principales sont divisées en deux où le riz cultivé d'une part et le maïs d'une autre.

Dispositif expérimental : S1 (2011-2012) et S3 (2013-2014)

F133 N4	F132 maïs + haricot-riz	E109 maïs + niébé + mucuna	E108 maïs + stylo	D85 N9	D84 maïs + haricot-riz	C61 B22	C60 B22	B37 maïs + stylo	B36 N4	A13 maïs + niébé + mucuna	A12 B22
F134 B22	F131	E110	E107	D86 B22	D83	C62 N9	C59 N4	B38	B35 N9	A14	A11 N4
F135 N9	F130	E111	E106	D87 N4	D82	C63 N4	C58 N9	B39	B34 B22	A15	A10 N9
F136 maïs - labour	F129 N4	E112 B22	E105 N4	D88 maïs - labour	D81 N4	C64 maïs + stylo	C57 maïs - labour	B40 N4	B33 maïs + niébé + mucuna	A16 N4	A9 maïs + haricot-riz
F137	F128 B22	E113 N9	E104 B22	D89	D80 B22	C65	C56	B41 B22	B32	A17 N9	A8
F138	F127 N9	E114 N4	E103 N9	D90	D79 N9	C66	C55	B42 N9	B31	A18 B22	A7
F139 N9	F126 maïs + stylo	E115 maïs + haricot-riz	E102 N4	D91 maïs + niébé + mucuna	D78 maïs + stylo	C67 B22	C54 maïs + niébé + mucuna	B43 maïs - labour	B30 maïs + haricot-riz	A19 N4	A6 maïs + stylo
F140 B22	F125	E116	E101 N9	D92	D77	C68 N9	C53	B44	B29	A20 B22	A5
F141 N4	F124	E117	E100 B22	D93	D76	C69 N4	C52	B45	B28	A21 N9	A4
F142 maïs + niébé + mucuna	F123 B22	E118 N9	E99 maïs - labour	D94 N4	D75 N9	C70 maïs + haricot-riz	C51 B22	B46 N4	B27 N9	A22 maïs - labour	A3 B22
F143	F122 N9	E119 N4	E98	D95 N9	D74 B22	C71	C50 N9	B47 B22	B26 B22	A23	A2 N9
F144	F121 N4	E120 B22	E97	D96 B22	D73 N4	C72	C49 N4	B48 N9	B25 N4	A24	A1 N4

t1= CONV
 t2= ACNM
 t3= ACHR
 t4= ACST

A, B, C, D, E et F : Blocs ou répétitions ; 1 à 144 : numéros des parcelles ; B22, N9 et N4 : variétés de riz

Figure 6 : Dispositif expérimental en split plot avec les pratiques culturales et les variétés de riz et les répétitions, de la 1^{ère} et de la 3^{ème} saison.

ESSAI STRIGA IVORY: S2 (2012-2013) et S4 (2014-2015)

F133 maïs - labour	F132 N9	E109 N9	E108 B22	D85 maïs - labour	D84 N4	C61 maïs + stylo	C60 maïs - labour	B37 N4	B36 maïs + niébé + mucuna	A13 N4	A12 maïs + haricot-riz
F134	F131 N4	E110 B22	E107 N4	D86	D83 N9	C62	C59	B38 B22	B35	A14 B22	A11
F135	F130 B22	E111 N4	E106 N9	D87	D82 B22	C63	C58	B39 N9	B34	A15 N9	A10
F136 N4	F129 maïs + haricot-riz	E112 maïs + niébé + mucuna	E105 maïs + stylo	D88 B22	D81 maïs + haricot-riz	C64 N9	C57 B22	B40 maïs + stylo	B33 B22	A16 maïs + niébé + mucuna	A9 N9
F137 N9	F128	E113	E104	D89 N4	D80	C65 B22	C56 N4	B41	B32 N4	A17	A8 N4
F138 B22	F127	E114	E103	D90 N9	D79	C66 N4	C55 N9	B42	B31 N9	A18	A7 B22
F139 maïs + niébé + mucuna	F126 N4	E115 N9	E102 maïs - labour	D91 N4	D78 N9	C67 maïs + haricot-riz	C54 N4	B43 N9	B30 B22	A19 maïs - labour	A6 N4
F140	F125 N9	E116 B22	E101	D92 B22	D77 N4	C68	C53 B22	B44 N4	B29 N9	A20	A5 B22
F141	F124 B22	E117 N4	E100	D93 N9	D76 B22	C69	C52 N9	B45 B22	B28 N4	A21	A4 N9
F142 N9	F123 maïs + stylo	E118 maïs + haricot-riz	E99 B22	D94 maïs + niébé + mucuna	D75 maïs + stylo	C70 N9	C51 maïs + niébé + mucuna	B46 maïs - labour	B27 maïs + haricot-riz	A22 N9	A3 maïs + stylo
F143 N4	F122	E119	E98 N9	D95	D74	C71 N4	C50	B47	B26	A23 B22	A2
F144 B22	F121	E120	E97 N4	D96	D73	C72 B22	C49	B48	B25	A24 N4	A1

t1= CONV
 t2= ACNM
 t3= ACHR
 t4= ACST

A, B, C, D, E et F : Blocs ou répétitions ; 1 à 144 : numéros des parcelles ; B22, N9 et N4 : variétés de riz

Figure 7 : Dispositif expérimental en split plot avec les pratiques culturales et les variétés de riz et les répétitions, de la 2^{ème} et de la 4^{ème} saison

La taille de la parcelle principale (Photo 5), représentant une pratique culturale, est de 270 m^2 ($15 \times 18 \text{ m}$). Chacune des trois sous-parcelles, représentant une variété de riz, mesure de 90 m^2 ($5 \times 18 \text{ m}$). Chaque sous-parcelle comprend une zone de comptage de *S. asiatica* de $37,8 \text{ m}^2$ ($4,2 \times 9 \text{ m}$) pour le riz (Figure 8) et 36 m^2 ($4 \times 9 \text{ m}$) pour le maïs (Figure 9), quatre zones d'échantillonnage de la banque de semences de *S. asiatica* de 6 m^2 ($2 \times 3 \text{ m}$) et deux zones d'échantillonnage de sol de 3 m^2 ($0,6 \times 5 \text{ m}$) ne se chevauchant pas pour les analyses chimiques du sol.



Photo 5 : Vue aérienne du dispositif expérimental de la saison 4 (2014-2015)

II.2.4. Préparations sur le terrain et gestion des cultures

Le champ expérimental laissé en jachère au cours des deux années précédant l'expérimentation a été labouré en octobre 2011 à l'aide d'une charrue à disques montée sur un tracteur, puis nettoyé de toutes les végétations de la jachère à la main. Après cela, le démottage s'est effectué à l'aide d'une herse montée sur un tracteur. A partir de la deuxième saison culturale dans les parcelles en pratique conventionnelle, le travail du sol est fait manuellement à l'aide d'un outil de préparation du sol appelé *angady*, un outil de travail du sol traditionnel, entre 15 à 20 cm de profondeur. Dans les parcelles en AC, le sol n'est plus labouré après la préparation du sol de la première saison de culture.

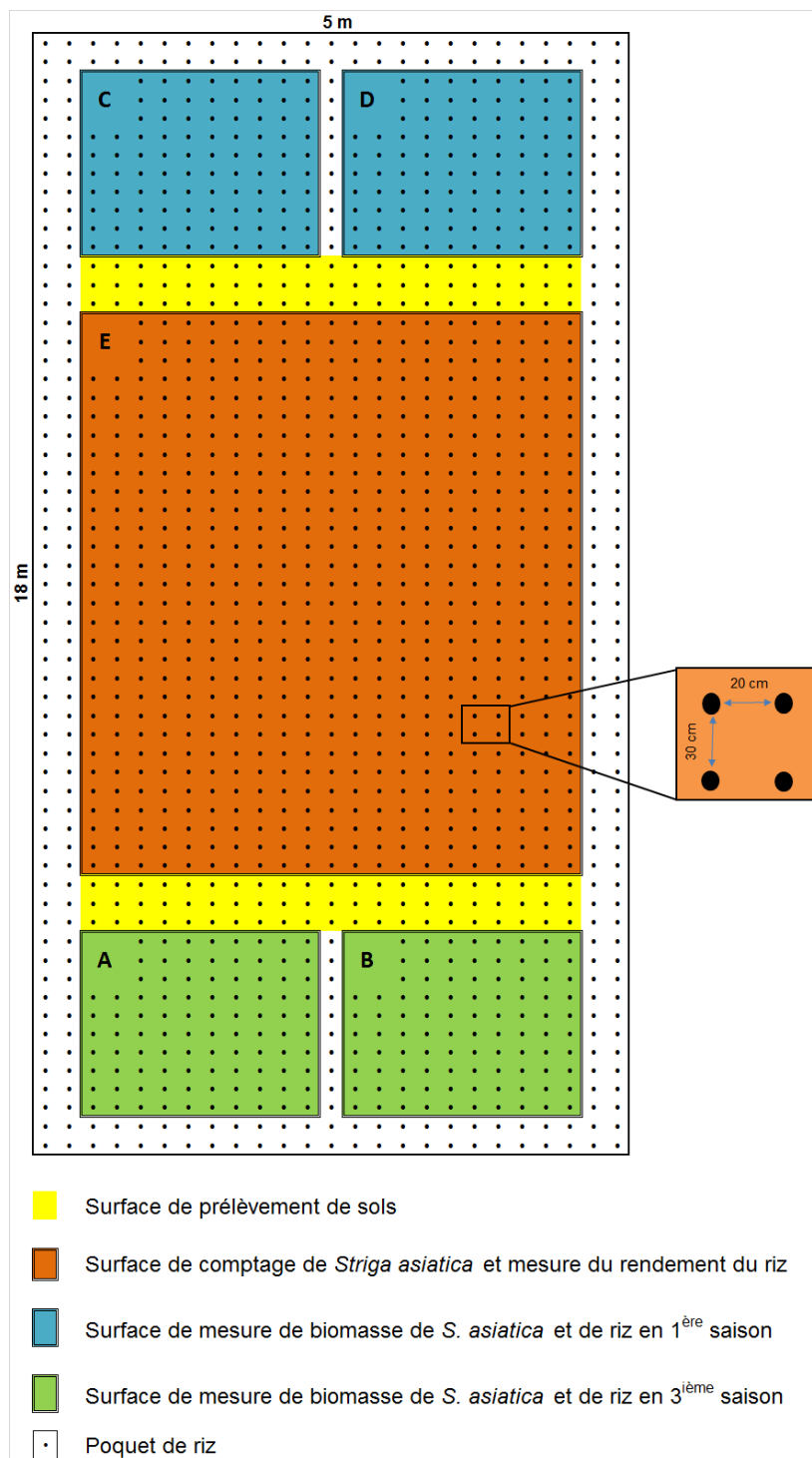


Figure 8 : Représentation d'une parcelle de riz

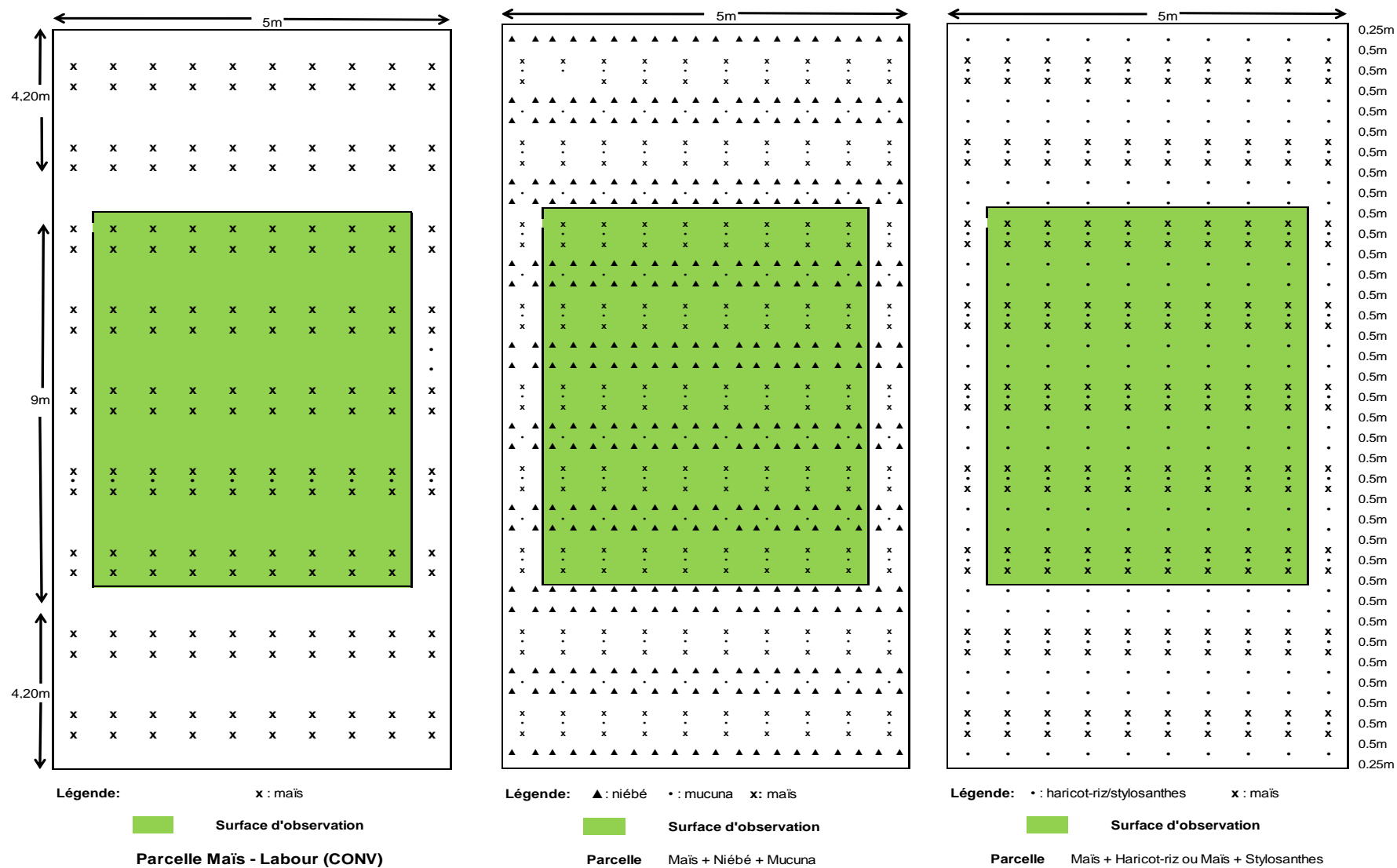


Figure 9: Représentation des parcelles de maïs en labour ou associé avec des légumineuses

Le riz a été semé du 5 au 8 décembre 2011, du 19 au 23 novembre 2012, du 18 au 22 novembre 2013 et du 24 au 28 novembre 2014. La distance de plantation est de 20 cm dans les lignes et de 30 cm entre les lignes, à 6–7 graines par poquet (Figure 8). Le maïs a été semé aux mêmes dates que le riz, en double ligne de 50 cm entre les deux rangées d'une paire et de 150 cm entre deux paires, à raison de deux semences par poquet et à une distance de 50 cm entre les rangées (Figure 9 et 10).

Pour le ACNM, le niébé a été semé en même temps que le maïs, entre deux paires de rangs de maïs. La dose de semis est de deux graines par poquet et à une distance de 25 cm dans le rang et de 50 cm entre les rangs donnant ainsi deux rangés entre chaque double ligne de maïs (Figure 11). Pour améliorer la production de biomasse de la culture de couverture, 50 jours après le semis (JAS), une rangée de *Mucuna* est installée entre deux rangées de niébé et entre les deux rangées d'une double ligne de maïs (Figure 11), à raison de deux graines par poquet. *Mucuna* est planté en relais avec le niébé pour maintenir une couverture végétale après la récolte du niébé et aussi pour éviter la compétition entre les deux plantes de couverture.

Pour ACHR, le riz est cultivé en même temps que le maïs. Deux rangées de haricot-riz sont placées entre deux paires de rangées de maïs (Figure 12). La dose de semis est de 5 à 7 semences par poquet et avec une densité de plantation de 50 cm dans les lignes et de 50 cm entre les lignes. Pour augmenter la biomasse de haricot-riz, une rangée supplémentaire est implantée entre les rangées de maïs jumelées à 50 JAS.

Dans les parcelles en ACST, la première année, *Stylosanthes* est semé à 14 JAS à 40 cm dans le rang et à 30 cm entre les rangs (Figure 13), entre le riz ou le maïs. La quantité de semence est environ 5 kg ha⁻¹. *Stylosanthes* est introduit plus tardivement afin de donner une croissance avancée à la culture principale. Cela réduit ainsi la concurrence des cultures en début de saison. Entre deux lignes de riz, une rangée de *Stylosanthes* est insérée, L'espacement entre *Stylosanthes* et le riz est de 15 cm. Entre deux paires de lignes de maïs, trois rangées de *Stylosanthes* sont cultivées. Une distance de 45 cm est gardée de chaque côté entre le maïs et *Stylosanthes*. Entre deux saisons (c'est-à-dire la période de mai à décembre), *Stylosanthes* est roulé et coupé trois fois : i) à la fin de la saison des pluies, vers mi-juin, ii) à mi-période de la saison sèche, en mi-septembre, et iii) avant de semer la prochaine récolte, début novembre. Les plantes de *Stylosanthes* repoussent naturellement par leurs souches pérennes et leurs graines produites l'année précédente repoussent spontanément. Cela garantit son maintien et sa gestion en couverture vivante.

À chaque saison de culture et pour toutes les pratiques culturales, le fumier de parc appliqué aux semis a une dose équivalant de 11 t.ha^{-1} dans les parcelles de riz et de $5,5 \text{ t.ha}^{-1}$ dans les parcelles de maïs. Cette fertilisation sans application d'engrais inorganique est conforme aux pratiques locales. Toutes les parcelles sont désherbées à la main deux fois au cours de la saison, à 46–50 et 74–85 JAS, par lequel toutes les mauvaises herbes autres que *Striga asiatica* ont été éliminées.

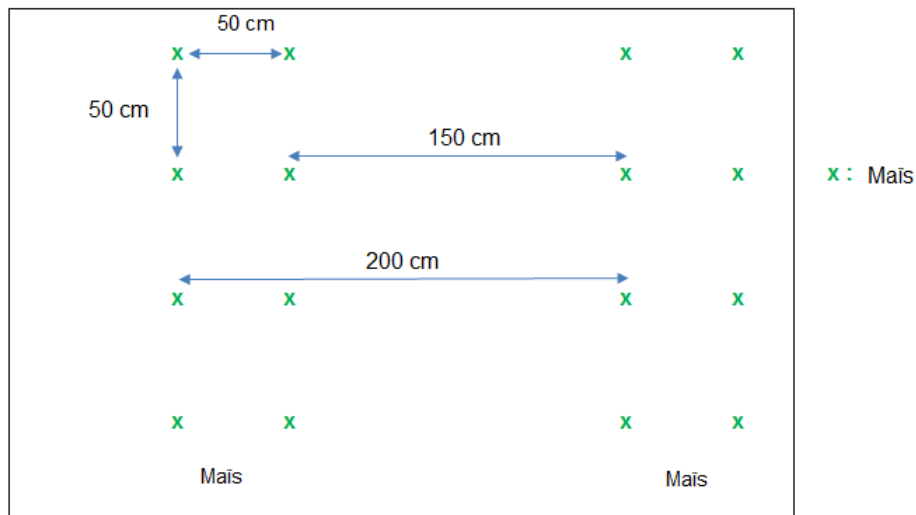


Figure 10 : Espacement et agencement des plantes en semis doubles rangs de maïs en CONV

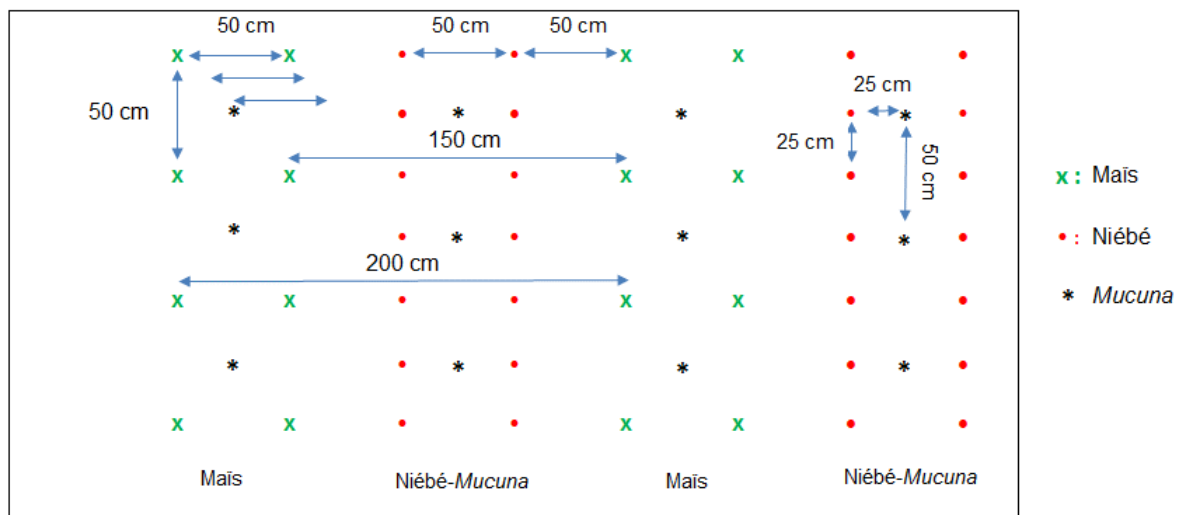


Figure 11 : Espacement et agencement des plantes en semis doubles rangs de maïs en ACNM

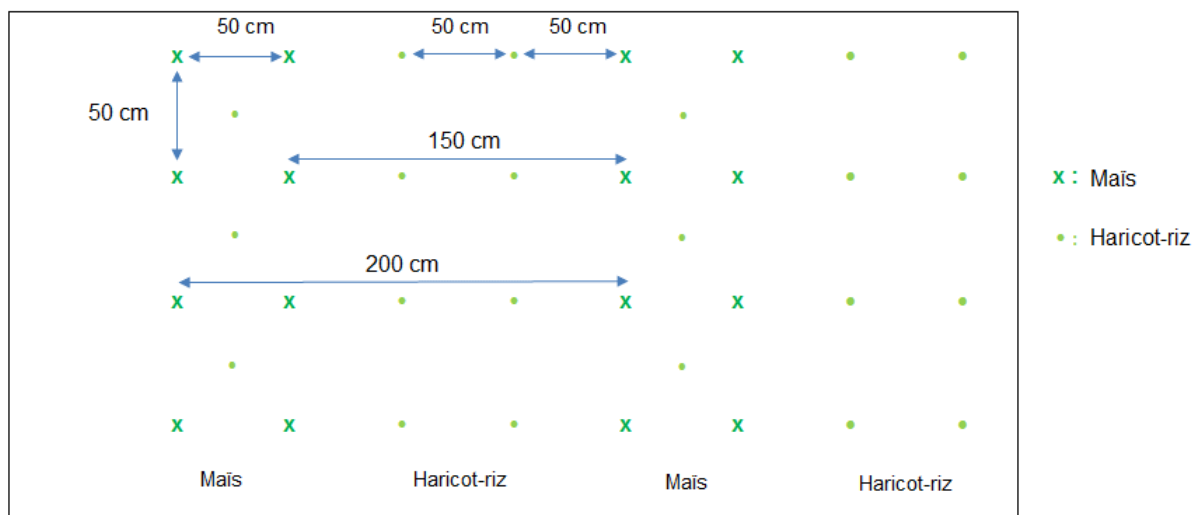


Figure 12 : Espacement et agencement des plantes en semis doubles rangs de maïs en ACHR

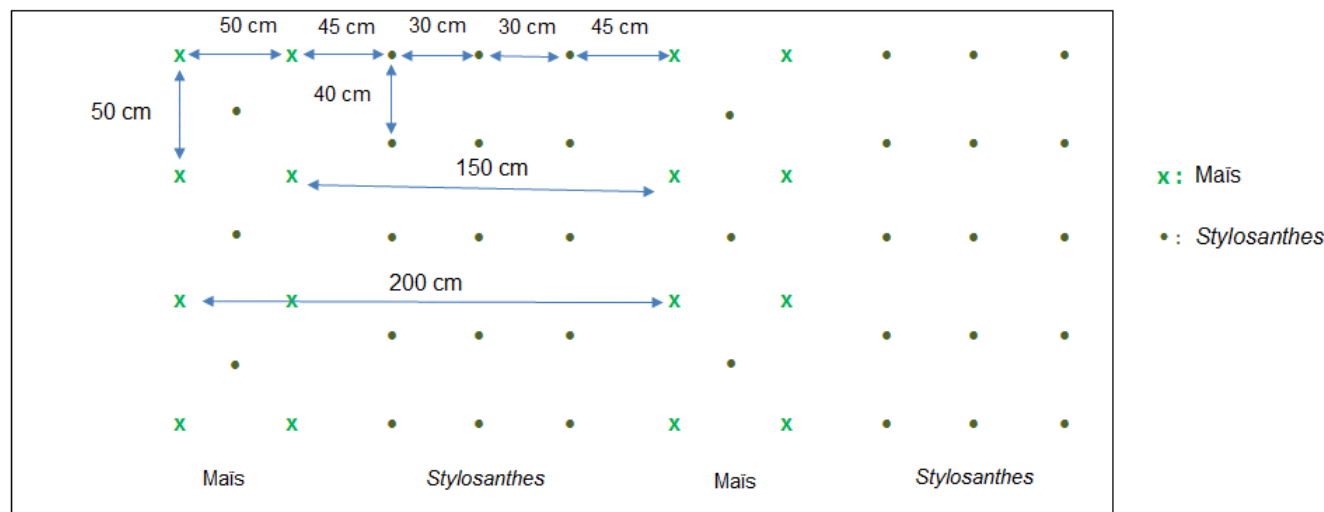


Figure 13 : Espacement et agencement des plantes en semis doubles rangs de maïs en ACST

II.2.5. Mesures et observations

Les évaluations des effets du traitement sur la fertilité du sol, après la saison 1 (juin 2012) et après la saison 4 (juin 2015) sont issues, des neuf échantillons de sol (de 0 à 10 cm de profondeur) prélevés dans chaque parcelle de maïs et de riz. Chaque échantillon contient 196,3 cm³ de sol. Pour chaque parcelle, un échantillon composite de 500 g de sol séché à l'air et tamisé (à 2 mm) est extrait pour déterminer l'azote (N Kjeldahl) et le phosphore assimilable (Olsen) au laboratoire de radio-isotopes (LRI) de l'Université d'Antananarivo à Madagascar.

Les effets du traitement sur le stock de graines de *S. asiatica* dans le sol sont obtenus par un échantillonnage des 10 premiers cm de sol effectué au début de l'expérimentation dans

les sous-parcelles de riz (novembre 2011) et à la fin de l'expérimentation (juin 2015). Les prélèvements du sol sont réalisés dans les mêmes sous-parcelles variétales, après la récolte du maïs (ainsi après deux cycles complets de la rotation riz-maïs). Pour ces deux dates, six échantillons de sol de 1 130,4 cm³ chacun sont pris dans chaque sous-parcelle, sur des emplacements fixes en dehors des zones utilisées pour l'échantillonnage. Ces sols sont mélangés dans un échantillon composite par répétition, à partir duquel 100 g (106 cm³) ont été sous-échantillonnés pour l'extraction et analyse de semences de *S. asiatica* d'après Hartman et Tanimonure (1991). Les dates d'émergence de *Striga asiatica*, dites E-date, (c'est-à-dire la première apparition du cotylédon) sont notées à chaque saison dans les deux cultures, à l'exception de la première saison chez le maïs. Les effectifs de *S. asiatica* au-dessus du sol sont recensés à 70, 90 et 110 jours après semis (JAS) dans les zones centrales de 37,8 m² (riz) et de 36 m² (maïs). Pour l'étude des effets du traitement sur les mauvaises herbes ordinaires, une mesure de la biomasse des mauvaises herbes autres que celle de *S. asiatica* est réalisée en quatrième saison (2014-2015) dans quatre zones de 1,0 × 0,9 m dans la zone centrale par sous-parcelle. Ces mauvaises herbes sont échantillonnées à deux périodes, juste avant chaque désherbage manuel, et séchées à l'étuve pendant 48 h à 60°C pour l'estimation de leurs matières sèches.

II.2.6. Analyses statistiques des données

Pour les dates d'émergence de *S. asiatica* (E-date), les données sont exprimées en jours après semis (JAS). Dans les cas où aucun *S. asiatica* n'est observé, les données non quantifiables sont traitées comme manquantes. Sur la base des comptages de *S. asiatica* émergés pour les trois dates (70, 90 et 110 JAS), les nombres maximaux de *S. asiatica* au-dessus du sol sont considérés et ce paramètre (NSmax) est utilisé pour des analyses plus approfondies. L'homoscédasticité et la normalité de toutes les données sont vérifiées d'après Sokal et Rohlf (1995). NSmax soumis à des transformations logarithmiques (Log10), à la suite de (Log [X + C]), où X est la première observation individuelle et C défini à 1,0. Les données sur les paramètres au-dessus du sol (E-date, NSmax et Biomasse mauvaises herbes) sont ensuite soumises à l'ANOVA, en utilisant un modèle mixte où Saison, Pratiques culturales et Variétés - pour les paramètres *Striga*, et Temps de désherbage, pratiques culturales et variétés - pour la biomasse de mauvaises herbes ordinaires - sont considérés comme des effets fixes et les pratiques culturales × Répétition comme un effet aléatoire (suivant le dispositif expérimental en *split-plot*). Les paramètres de fertilité du sol (N total et P assimilable) ont été soumis à une ANOVA, en utilisant un modèle mixte, avec Saison

(Saison 1, Saison 4) et Pratiques culturales en tant qu'effets fixes et Pratiques culturales \times Répétition en tant qu'effet aléatoire. Les moyennes ajustées de tous les paramètres sont comparées en utilisant le test de Fisher au LSD. Les moyennes et les valeurs de LSD présentées dans les résultats sont transformées de nouveau si nécessaire. Ces données sur les paramètres au-dessus du sol sont analysées avec XLSTAT, version 2014.5.03 (MS Excel, 2014). Le nombre de graines de *Striga asiatica* extraites du sol après quatre saisons expérimentales (deux cycles de rotation) est analysé à l'aide d'un modèle mixte linéaire généralisé avec une distribution binomiale négative afin de prendre en compte les données de comptage. Le nombre de graines avant l'expérience (G_0) est utilisé comme co-variable et une ANCOVA est menée pour vérifier s'ils affectaient (G_0) le nombre de semences après quatre saisons. Dans les cas où cela ne serait pas significatif, une ANOVA est réalisée, avec une variété de riz (V) et une pratique culturale (PC) comme effets fixes et une répétition comme effet aléatoire, suivies d'une comparaison des moyennes (lorsque les effets sont significatifs) en utilisant le test honnête de la différence significative de Tukey. Les premières données de *Striga asiatica* sont analysées à l'aide du logiciel SAS / STAT, version 9.2 du système SAS pour Windows (SAS Institute, 2011).

II.3. Résultats

II.3.1. Variation de l'azote et du phosphore dans le sol

Aucun effet significatif d'interaction entre le temps et les pratiques culturales n'a été observé sur l'azote total ou sur le phosphore assimilable du sol. Parmi les principaux effets, seul le temps a eu un effet significatif ($F = 35,53$; $P = 0,002$; ddl = 1) sur la teneur en azote total du sol (Tableau 1). En 2011, la teneur moyenne en azote total (0 à 10 cm) a été de $1,433 \text{ g kg}^{-1}$, cette teneur a considérablement augmenté pour atteindre $1,685 \text{ g kg}^{-1}$ en 2015. Soit un accroissement d'environ 17% en quatre ans. Aucun effet temporel ni effet de la culture sur le phosphore assimilable n'a été observé.

Tableau 1 : Teneur en azote total du sol en S1 (2011) et S2 (2015)

	2011	2015
N- total (g.kg^{-1})	1,433	1,685
ddl = 1	$F = 35,53$	$P = 0,002$

ddl : degré de liberté ; F : test de Fisher ; P : Probabilité

II.3.2. Dates d'émergence de *Striga asiatica* dans le riz et le maïs

Le tableau 2 montre les principaux effets significatifs de la saison ($P < 0,0001$ dans le riz ; $P = 0,002$ dans le maïs) et de la variété de riz sur les dates de la première apparition de *S. asiatica* dans le riz ($P < 0,0001$) et le maïs après le riz ($P < 0,01$).

Tableau 2 : Date d'émergence et nombre maximal de *Striga asiatica* dans les parcelles de riz et de maïs.

Source	<i>S. asiatica</i> sur le riz					<i>S. asiatica</i> sur le maïs				
	<i>E-date</i>			<i>NSmax</i>		<i>E-date</i>			<i>NSmax</i>	
	ddl	F	P	F	P	ddl	F	P	F	P
Saison (S)	3	12,6	< 0,0001	67,5	< 0,0001	2	6,6	0,002	6,7	0,0016
Pratiques culturales (PC)	3	2,9	0,07	16,9	< 0,0001	3	2,4	0,10	14,5	0,0003
Variété (V)	2	13,9	< 0,0001	83,4	< 0,0001	2	6,8	0,001	14,3	< 0,0001
S × PC	9	0,6	0,79	2,7	0,006	6	1,6	0,14	9,1	< 0,0001
S × V	6	2,6	0,02	7,7	< 0,0001	4	0,6	0,61	1,0	0,4159
PC × V	6	2,4	0,03	5,1	< 0,0001	6	0,8	0,50	4,1	0,0008
S × PC × V	18	0,6	0,92	1,3	0,17	12	1,1	0,35	2,7	0,0028

Analyse de la variance de la date de première émergence (*E-date*) et du nombre maximal (*NSmax*) de *S. asiatica* dans le riz et le maïs, avec la saison (S), les pratiques culturales (PC), la variété de riz (V) et leurs interactions en tant que sources de variation.

ddl : degré de liberté ; F : test de Fisher ; P : Probabilité

Les effets de l'interaction saison × variété de riz et l'interaction pratiques culturales × variété de riz sur les dates d'émergence de *S. asiatica* n'ont été significatifs que pour le riz ($P < 0,05$; Tableau 2). Aucune autre interaction significative n'a été observée.

Les premières dates d'émergence de *S. asiatica* ont varié de 69 (saison 1) à 76 (saison 4) JAS dans le riz et de 60 (saison 2) à 68 JAS (saison 3) dans le maïs (Tableau 3). Au cours des saisons, l'émergence de *S. asiatica* a été plus précoce dans les parcelles contenant la variété de riz B22 (67 JAS) et plus tardive avec NERICA-4 (77 JAS). Le même effet a été observé dans les parcelles de maïs précédées de riz, avec une première levée à 60 JAS dans les anciennes parcelles de B22 et 68 JAS dans celles de NERICA-4.

Pour le riz, au fil des saisons, *S. asiatica* est apparu plus tôt avec la variété B22 sous CONV (62 JAS) et la dernière apparition a été avec NERICA-4 après ACHR (81 JAS) et avec NERICA-9 après ACST (79 JAS).

Tableau 3 : Première date d'émergence de *Striga asiatica* dans le riz et le maïs.

		Dates d'émergence de <i>S. asiatica</i> avec le riz (<i>E-date</i> ; JAS)										Dates d'émergence de <i>S. asiatica</i> avec le maïs (<i>E-date</i> ; JAS)									
		S1		S2		S3		S4		Moyenne		S1		S2		S3		S4		Moyenne	
S × PC	CONV	76,9		72,9		59,9		64,7		68,6		-	55,3		64,4		63,0		60,9		
	ACNM	78,9		72,3		65,0		73,3		72,4		-	62,9		71,6		63,2		65,9		
	ACHR	77,7		72,9		66,9		68,7		71,6		-	59,1		69,0		58,4		62,2		
	ACST	79,1		78,6		70,3		76,2		76,1		-	64,0		66,2		71,3		67,2		
	Moyenne (S)	68,6	B ¹	72,4	AB	71,6	B	76,1	A			-	60,3	B	67,8	A	64,0	AB			
	LSD (S)	4,20										4,04									
S × V	B22	76,1	abc	69,4	cd	56,7	e	65,8	d	67,0	Z	-	54,8		65,1		60,9		60,3	Y	
	NERICA-9	77,8	ab	78,8	a	63,8	de	70,6	bcd	72,7	Y	-	62,4		65,4		64,1		64,0	XY	
	NERICA-4	80,5	a	74,3	abc	76,1	abc	75,8	abc	76,7	X	-	63,7		72,9		66,9		67,8	X	
	LSD (V)	3,64										4,04									
	LSD (S × V)	7,28																			
PC × V		CONV		ACNM		ACHR		ACST				CONV		ACNM		ACHR		ACST			
	B22	61,5	f	67,3	def	65,0	ef	74,2	abcd			59,0		59,2		58,2		64,7			
	NERICA-9	68,6	cdef	73,9	abcd	69,1	bcde	79,3	a			62,4		67,2		59,9		66,5			
	NERICA-4	75,7	abc	75,9	ab	80,6	a	74,6	abc			61,2		71,4		68,5		70,3			
	LSD (PC × V)	7,28																			

¹Les moyennes suivies de lettres différentes sont significativement différentes ($P < 0,05$).

Moyenne de la première date de levée de *S. asiatica* (E-date) du riz et du maïs, suivant les quatre pratiques culturales (PC = CONV, ACNM, ACHR et ACST) et les trois variétés de riz (V = B22, NERICA-9 et NERICA-4) pendant quatre saisons culturales (S = S1 ; S2 ; S3 ; S4).

JAS : nombre de jour après semis ;

LSD : différences des erreurs standards.

II.3.3. Densités de pieds de *Striga asiatica* dans le riz

Des effets significatifs de la saison, des pratiques culturales et des variétés de riz ($P < 0,0001$) ont été observés sur les densités de plantes de *S. asiatica* (nombre maximal.m⁻²; NSmax) dans le riz (Tableau 4). Les interactions des couples de facteur i) (saison, pratiques culturales), ii) (saison, variété) et iii) (pratiques culturales, variété), respectivement $P = 0,006$, $P < 0,0001$ et $P < 0,0001$ ont eu également des effets significatifs d'interaction sur NSmax.

Parmi les pratiques culturales, ACST a eu les plus faibles densités de *S. asiatica*, suivi de ACHR (Tableau 4). Sous la pratique conventionnelle (CONV) évaluée par saison, la densité de *S. asiatica* a été significativement plus élevée que sous toutes pratiques culturales en AC. Seule ACST a donné une réduction constante de la densité de la plante parasite par rapport à CONV. Par rapport à CONV, les densités de *S. asiatica* ont été réduites en moyenne de 24 % après ACNM, de 53 % après ACHR et de 79 % après ACST. Les densités de *S. asiatica* avec les variétés NERICA-9 et NERICA-4 ont été significativement inférieures à celles de B22 (Tableau 4). La différence entre B22 et NERICA-9 moyennement résistant n'a été significative que lors des deux dernières saisons, lorsque les niveaux d'infestation de *S. asiatica* étaient généralement plus élevés. La variété plus résistante NERICA-4 avait des niveaux d'infestation significativement plus bas que B22 au cours des quatre saisons. Par rapport à B22, la réduction de la densité de *S. asiatica* était de 57% sous NERICA-9 et de 91% sous NERICA-4. Les densités de *S. asiatica* sous NERICA-4 ont été, à leur tour, significativement inférieures à celles de NERICA-9.

Au cours des saisons culturales, les plus fortes densités de *S. asiatica* ont été observées sous CONV avec B22. Avec toutes les variétés NERICA sous CONV, ces valeurs ont été déjà nettement inférieures. Des niveaux d'infestation encore plus faibles ont été obtenus lorsque les variétés NERICA ont été combinées à des pratiques culturales en AC, bien que pour la variété la plus résistante, NERICA-4, les différences de densités de *S. asiatica* selon les pratiques culturales n'aient pas été significatives. Les meilleures combinaisons ont été NERICA-4 sous ACHR, suivies de ACST et de ACNM, puis NERICA-9 sous ACST (Tableau 4). Par rapport au CONV avec B22, les niveaux d'infestation ont été réduits plus de 95 % à la suite à ces combinaisons.

Tableau 4 : Densité maximale de *Striga asiatica* dans les parcelles de riz et de maïs

		Densité maximale de <i>S. asiatica</i> avec le riz (<i>NSmax</i> ; plants.m ⁻²)										Densité maximale de <i>S. asiatica</i> avec le maïs (<i>NSmax</i> ; plants.m ⁻²)										
		S1 ¹		S2		S3		S4		Moyenne		S1 ²		S2		S3		S4		Moyenne		
S x PC	CONV	0,5	efgh ¹	1,6	cd	8,7	a	1,6	cd	2,1	A	0,05		9,4	a	1,7	bc	1,9	bc		3,4	A ¹
	ACNM	0,3	gh	0,9	defg	5,3	b	1,9	c	1,6	B	0,05		1,9	bc	2,1	b	2,8	b		2,2	B
	ACHR	0,2	h	0,5	fgh	3,3	b	1,0	cdef	1,0	C	0,03		2,7	b	1,9	bc	2,0	bc		2,2	B
	ACST	0,2	h	0,1	h	1,3	cde	0,4	fgh	0,4	D	0,04		0,00	d	0,00	d	1,0	c		0,3	C
	Moyenne	0,28	l	0,69	J	3,92	L	1,14	K					2,3	A	1,2	B	1,8	A			
	LSD (S)	0,22											0,23									
	LSD (PC)	0,22											0,27									
	LSD (SxPC)	0,48											0,52									
S x V	B22	0,66	def	1,5	c	12,2	a	2,9	b	2,8	A			3,7		1,59		2,4			2,5	A
	NERICA-9	0,20	fg	0,9	cd	4,1	b	1,0	cd	1,2	B			2,6		1,57		1,9			2	A
	NERICA-4	0,1	g	0,1	g	0,8	de	0,3	efg	0,3	C			1,1		0,65		1,3			1	B
	LSD (V)	0,19										0,23										
	LSD(SxV)	0,41																				
PC x V		CONV		ACNM		ACHR		ACST				CONV		ACNM		ACHR		ACST				
	B22	6,1	a	4,1	a	2,1	b	0,9	cd			7,0	a	2,7	bcd	2,5	bcd	0,4	fg			
	NERICA-9	2,2	b	1,6	bc	1,2	c	0,3	e			3,1	bc	2,2	bcd	3,9	b	0,2	g			
	NERICA-4	0,4	de	0,3	e	0,1	e	0,2	e			1,5	cd	1,8	cde	0,9	ef	0,2	g			
	LSD (PC x V)	0,41										0,52										

¹ Les valeurs Moyenne et LSD sont retransformées après analyse de la variance; les moyennes suivies de lettres différentes sont significativement différentes ($P < 0,05$).² Aucun facteur de variété de riz dans S1

Nombre moyen de l'effectif maximal de *S. asiatica* au sol (*NSmax* ; m⁻²) avec le riz et le maïs sur trois dates d'observation, suivant les quatre pratiques culturales (PC = CONV, ACNM, ACHR et ACST) et trois variétés de riz (V = B22, NERICA-9 et NERICA- 4) pendant quatre saisons culturales (S = S1 ; S2 ; S3 ; S4).

II.3.4. Densités de pieds de *Striga asiatica* chez le maïs

Les principaux effets significatifs de la saison, des pratiques culturales et des variétés de riz, ainsi que des effets de l'interaction de la saison \times pratiques culturales \times variétés et de l'interaction saison \times pratiques culturales \times variété (tous à $P < 0,01$) ont été constatés sur les densités de *S. asiatica* en surface (Tableau 4). L'analyse statistique a été effectuée à partir de la saison 2, car lors de la saison 1, le maïs n'avait pas été précédé du riz.

Au cours des saisons, la pratique conventionnelle (CONV) a montré des niveaux d'infestation au *S. asiatica* significativement plus élevés que n'importe quelle pratique d'AC (Tableau 4). Parmi les pratiques en AC, ACST a conduit des niveaux d'infestation significativement inférieurs par rapport au ACNM et au ACHR. Ces dernières ont globalement réduit l'infestation de *S. asiatica* à 35% par rapport au CONV, alors que l'ACST l'a réduit de 92%. ACST a donné une réduction significative de l'infestation de la plante parasite dans les saisons 2 et 3, mais pas dans la saison 4. Les deux autres pratiques de l'AC n'ont été efficaces que durant la saison 2.

Dans les parcelles de maïs après la variété de riz NERICA-4, la densité moyenne de *S. asiatica* sur les trois saisons a été nettement inférieure à celle du maïs après NERICA-9 et B22 (Tableau 4). Par rapport à B22, les densités ont été réduites de 20% après NERICA-9 et de 60% après NERICA-4. La réduction la plus significative des densités de *S. asiatica* chez le maïs a été obtenue avec ACST dans des parcelles précédées par NERICA-9 et NERICA-4. Le changement de la variété de riz précédente de B22 à NERICA-4 sous CONV a déjà réduit l'infestation au *S. asiatica* de 79% chez le maïs. Le changement des pratiques culturales du maïs, avec B22 comme variété de riz précédente, de CONV à ACST, a réduit l'infestation au *S. asiatica* de 95%. La combinaison des deux options, maïs sous ACST après NERICA-4, a permis de réduire la densité de la plante parasite de 97 % par rapport à la pratique conventionnelle après B22.

II.3.5. Variation de la banque de semences de *Striga asiatica* du sol

Seules les pratiques culturales ont eu un effet significatif sur la densité des graines de *S. asiatica* après quatre campagnes (Tableau 5). Les densités de graines de *Striga asiatica* dans le sol ont été significativement plus élevées après la rotation riz-maïs conventionnelle (CONV), comparées à toutes les pratiques de l'AC (ACNM, ACHR et ACST), tandis que les différences entre les pratiques de l'AC n'ont pas été significatives (Tableau 5). Par rapport au CONV, la densité des graines de *S. asiatica* dans le sol a pu être réduite d'un facteur 4 (ACNM) à 7 (ACHR) après quatre saisons. Cependant, aucun des traitements n'a donné une

diminution de la taille du stock de semences de *S. asiatica* par rapport à la situation initiale (non illustrée).

Tableau 5 : Stock de graines de *Striga asiatica* dans le sol à la fin de l'expérimentation

Analyses	Effets	ddl	F	P
1. ANCOVA	Variétés (V)	2	3,61	0,04
	Pratiques culturales (PC)	3	11,04	0,00
	V × PC	6	0,74	0,62
	Graines # au départ (S0)	1	0,34	0,56
	S0 × V	2	0,53	0,60
	S0 × PC	3	0,95	0,43
	S0 × V × PC	6	1,25	0,31
2. ANOVA	Variétés (V)	2	1,77	0,18
	Pratiques culturales (PC)	3	9,77	<0,0001
	V × PC	6	0,89	0,51
Pratiques culturales		nombre de graines de <i>S. asiatica</i> m ⁻² (0-10 cm)		
3. Comparaison des moyennes	CONV		8022	a ¹
	ACNM		1943	b
	ACST		1725	b
	ACHR		1098	b

Résultats de l'analyse en trois étapes du nombre de graines de *S. asiatica* dans le sol, à la suite d'une distribution binomiale négative avec 1. Analyse de la variance (ANCOVA), 2. Analyse de la variance (ANOVA) et 3. Comparaison des moyennes (Tukey). La variété de riz (V), les pratiques culturales (PC), le nombre de graines au début de l'expérience (S0) et les interactions sont des sources de variation dans l'ANCOVA et la variété de riz (V), les pratiques culturales (PC) et les interactions sont des sources de variation de l'ANOVA. Les moyennes des nombres de graines de *S. asiatica* dans le sol à une profondeur de 0 à 10 cm (graines.m⁻²) sont comparées sur quatre pratiques culturales (CONV, ACNM, ACHR et ACST).

¹ Les moyennes suivies de lettres différentes sont significativement différentes ($P < 0,05$).

II.3.6. Effets des pratiques culturales et de la variété de riz sur la biomasse de mauvaises herbes ordinaires

Aucun effet d'interaction significatif à deux ou à trois voies entre le temps d'intervention de désherbage, la variété de riz et les pratiques culturales n'a été observé sur la biomasse de mauvaises herbes ordinaires du riz au cours de la saison 4. Parmi les effets principaux, le temps d'intervention de désherbage ($F = 15,7$; $P = 0,0001$; $ddl = 1$) et les pratiques culturales ($F = 83,5$; $P < 0,0001$; $ddl = 3$) seulement ont eu des effets importants sur la biomasse des mauvaises herbes. Les pratiques CONV et ACST ont eu tous les deux significativement moins de biomasse de mauvaises herbes que les deux autres pratiques culturales ACNM et

ACHR (Figure 14). La pratique avec le niébé-*Mucuna* (ACNM) a présenté une biomasse de mauvaises herbes significativement supérieure à celle utilisée avec le haricot-riz (ACHR).

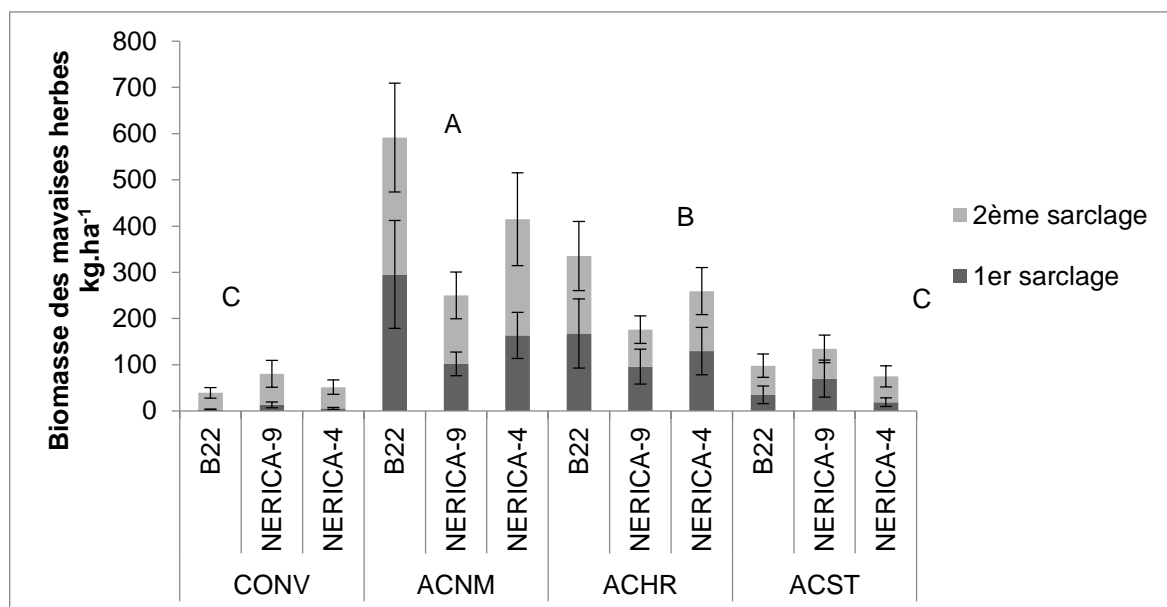


Figure 14: Poids sec de la biomasse de mauvaises herbes en saison 4

Poids sec de la biomasse de mauvaises herbes pendant la saison 4 avec le temps de désherbage (gris foncé: D1; gris clair: D2), les pratiques culturales (CONV, ACNM, ACHR, ACST), la variété de riz (B22, NERICA-9, NERICA-4) en tant que facteurs. Comparaison des moyennes effectuées sur les poids totaux (prélèvements D1 et D2) de la biomasse de mauvaises herbes par pratique culturale (BMH tot ; g m⁻²). Différentes lettres (A, B, C) indiquent des différences significatives ($P < 0.0001$).

II.4. Discussion

Cette étude a montré que grâce à une combinaison de non labour, de paillage des résidus de récolte et de cultures de couverture (généralement désignée par agriculture de conservation), l'infestation à *S. asiatica* dans une rotation riz-maïs pourrait être retardée et réduite. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec *S. guianensis* en tant que plante de couverture et NERICA-4 en tant que variété, les effets de contrôle de cette variété de riz résistant étant perceptibles sur la culture de maïs suivante. *Stylosanthes guianensis* s'est également révélé efficace pour lutter contre les mauvaises herbes ordinaires.

Cette section est divisée en une discussion sur les avantages des pratiques en agriculture de conservation (AC) en matière de lutte contre les mauvaises herbes et de *Striga* (II.4.1), le rôle que peuvent jouer les variétés résistantes pour améliorer l'efficacité de la lutte contre *Striga* sous AC (II.4.2) et la notion que de telles innovations ne sont pertinentes que dans les

zones où les petits producteurs de céréales sont confrontés à des contraintes (parasites) de mauvaises herbes et de sols similaires à celles rencontrées dans la zone d'étude (II.4.3).

II.4.1. Agriculture de conservation et lutte contre les mauvaises herbes

L'agriculture de conservation (AC) est un terme large qui décrit l'application plus ou moins simultanée de (1) travail du sol réduit, (2) protection permanente des sols par le paillage et (3) augmentation de la biodiversité par la diversification des cultures (Scopel et *al.*, 2013). Dans la présente étude, trois pratiques d'AC, avec différentes options de diversification des cultures (riz associé à une culture intercalaire maïs-niébé-*Mucuna* ou maïs-haricot-riz, et riz intercalé avec *Stylosanthes* et pivoté à une culture intercalaire maïs-*Stylosanthes*) ont été comparées à celle de la pratique conventionnelle de l'agriculteur d'une rotation riz-maïs sans culture intercalaire. Cette étude présente la première preuve que l'application d'une pratique d'AC retarde considérablement le parasitisme d'une espèce de *Striga* et réduit les niveaux d'infestation de la plante parasite chez le riz et le maïs. L'effet observé des pratiques d'AC sur l'avantage est sous-jacent à un large éventail de causes directes et indirectes (Figure 15). Ces causes peuvent être physiques, biochimiques ou biologiques, elles peuvent apparaître à différents niveaux et peuvent se renforcer ou s'affaiblir mutuellement. Toutes les pratiques d'AC, en ne labourant pas le sol, peuvent réduire l'infestation de la plante parasite car moins de graines de *Striga* atteignent la zone racinaire (van Ast et *al.*, 2005). De plus, les graines restant à la surface du sol peuvent être prédisposées à une prédation accrue par les coléoptères broyeurs, comme le montrent les graines de mauvaises herbes ordinaires (Kulkarni et *al.*, 2015). En outre, l'augmentation de la biomasse vivante et morte des plantes de couverture pourrait accroître encore l'abondance et l'activité de la micro-faune et ainsi, la prédation des semences (Pullaro et *al.*, 2006) et la pourriture. En raison de l'enchevêtrement des différentes composantes de l'AC et des nombreux effets potentiels directs et indirects qu'elles peuvent avoir (comme le montre la Figure 15), la contribution de principes individuels ne peut pas être évaluée par cette étude. C'est la faiblesse typique de nombreuses études sur le CA, comme l'avaient déjà suggéré Giller et *al.* (2009). Il est en effet essentiel d'étudier plus avant l'efficacité ou l'inefficacité de chacune des composantes, car cela contribuerait à optimiser ou à simplifier les approches adoptées par les petits exploitants.

La mise en place de la présente étude permet toutefois d'évaluer le rôle des différentes espèces de plantes de couverture dans les pratiques des AC, car les autres traitements (zéro travail du sol et non-élimination des résidus de culture) sont les mêmes d'une pratique à l'autre.

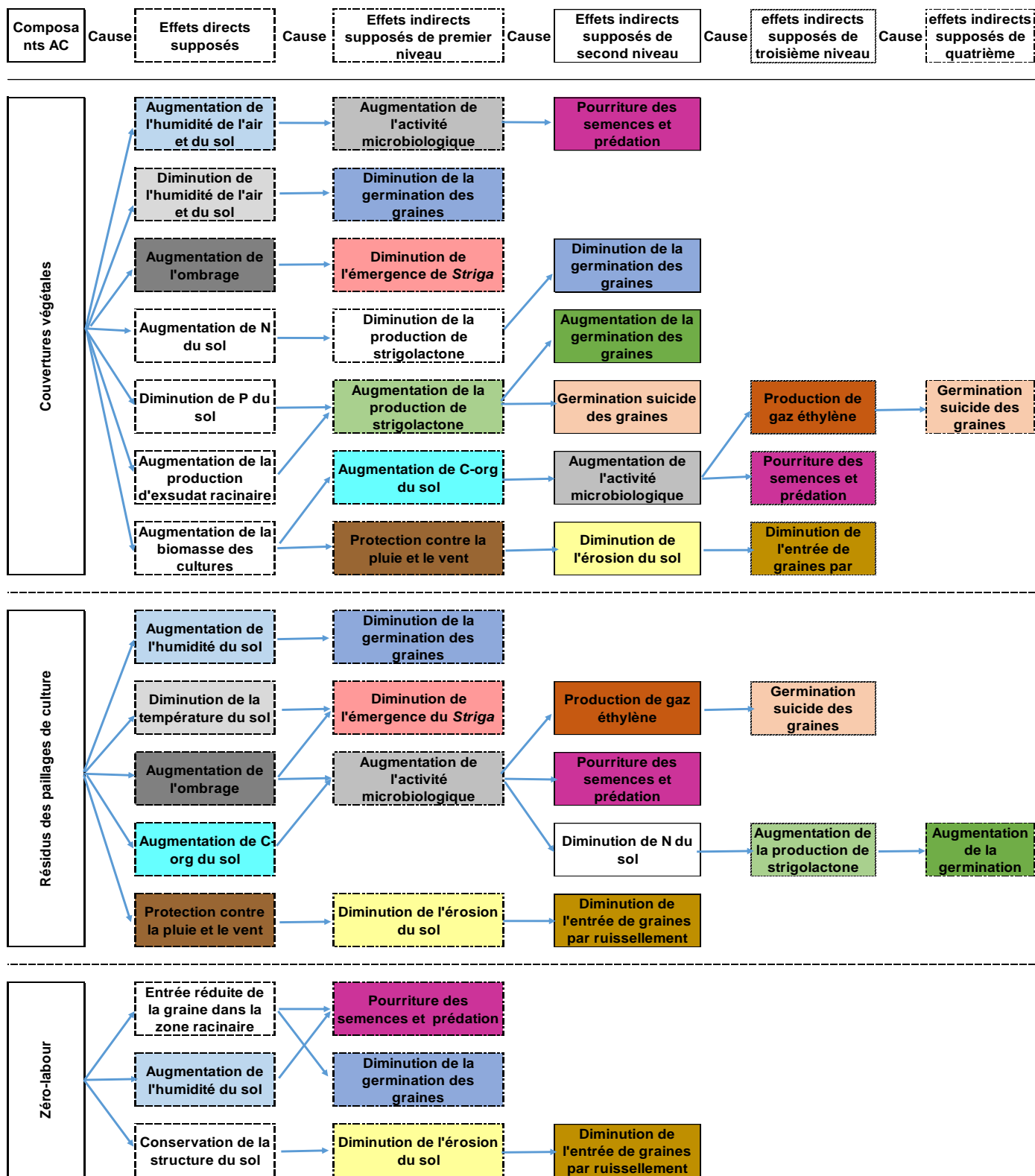


Figure 15: Causes présumées directes et indirectes entre les composantes de l'agriculture de conservation (AC), plantes de couverture, paillassage des résidus de culture, du zéro labour et *Striga asiatica*.

Les zones avec le même style de bordure indiquent le même niveau de traitement. Les cases de la même couleur indiquent le même effet supposé.

Les plantes de couverture peuvent différer par leur efficacité pour i) provoquer la germination suicide, ii) améliorer la fertilité du sol iii) et produire de la biomasse, en fournissant (suppression des mauvaises herbes, diminution de la température et augmentation de l'humidité) canopée et paillage.

L'effet suppressif des pratiques d'AC sur *S. asiatica* pourrait être dû à la germination suicide des graines de *S. asiatica* provoquée par les plantes de couverture (Figure 15). Plusieurs légumineuses se sont avérées efficaces pour piéger les espèces de *Striga* parasitant les cultures de céréales (Ransom, 2000). Certaines études confirment l'efficacité du niébé (Carsky et al., 1994; Gbehounou et Adango, 2003) et de *Mucuna* (Kiwia et al., 2009) à cet égard, bien que les mécanismes de suppression de *Mucuna* ne soient pas encore élucidés. Que *Stylosanthes* puisse provoquer ou non la germination suicide de *S. asiatica* faisant l'objet d'études supplémentaires. Pour une espèce vivace comme *Stylosanthes*, il s'agirait d'un mécanisme de contrôle très efficace de *S. asiatica* puisqu'il fonctionnerait pendant les deux saisons du cycle de rotation.

Les plantes de couverture comme les légumineuses peuvent également augmenter la fertilité du sol et contribuer ainsi à la suppression de *S. asiatica*. Les légumineuses capables de fixer l'azote atmosphérique peuvent améliorer la teneur en azote du sol après plusieurs cycles de culture (Giller, 2001), mais ce processus nécessite du phosphore supplémentaire (Rotaru et Sinclair, 2009). L'azote (N) et le phosphore (P) jouent tous deux un rôle important dans la production de strigolactones dérivées de la racine de la plante l'hôte (Yoneyama et al., 2013) ; des niveaux croissants de ces éléments peuvent réduire la production de ces hormones végétales et des niveaux décroissants produisent l'effet inverse. Les modifications de N et de P affectent par conséquent les probabilités d'infestation des cultures par *S. asiatica* (Jamil et al., 2012) d'un milieu. Dans la présente étude, les modifications observées de N ou de P du sol, par rapport aux situations avant et après les 4 saisons expérimentales, ne sont pas significativement affectés par les pratiques culturales. Par conséquent, les différences entre l'infestation de *S. asiatica* observées sur une culture à une autre ne peuvent pas être attribuées aux effets de l'amélioration de la fertilité du sol par ces traitements.

Un ombrage accru par les plantes de couverture pourrait être une autre explication de la suppression de *S. asiatica* suite aux pratiques de l'AC (Figure 15). *Stylosanthes spp.* sont connus pour leur production prolifique de biomasse et sont donc souvent proposés comme agents de lutte contre les mauvaises herbes dans les systèmes de culture de céréales tropicales (Chikoye et al., 2008; Saito et al., 2010). Il est probable que cette capacité de réduire les mauvaises herbes attribuée à *Stylosanthes* serait responsable, du moins en partie, de l'effet

suppressif sur *Striga asiatica*, l'étude ci-présente montre d'ailleurs que *Stylosanthes* par rapport aux autres plantes utilisées en AC possède cette capacité supérieure.

La concurrence des mauvaises herbes constitue une faiblesse majeure de l'AC, à moins que la couverture du sol soit suffisamment efficace pour supprimer les mauvaises herbes (Giller et *al.*, 2009). L'étude ci-présente semble le confirmer. En moyenne sur quatre saisons, l'ACNM et l'ACHR ont produit plus de biomasse de résidus de culture respectivement 1,3 à 1,8 fois que celle produite avec le CONV, tandis que l'ACST a produit 6,7 fois plus de biomasse (Randrianjafizanaka, 2018). Une des raisons évidentes de cette différence est, encore une fois, la longueur du cycle des plantes de couverture. Niébé, *Mucuna* et haricot-riz sont des espèces annuelles en culture intercalaire avec le maïs seulement, alors que *Stylosanthes* a une biomasse pérenne produisant à la fois dans la saison culturale du maïs et du riz

II.4.2. Agriculture de conservation - variétés résistantes et effets

On a observé des effets nets de réduction de l'infestation de *S. asiatica* par des pratiques culturales sans labour avec des plantes de couverture, du paillage de résidus de culture et de l'utilisation de variétés de riz résistantes dans les deux cycles d'un système de rotation riz-maïs, comparés à la pratique paysanne avec la variété populaire locale B22. Un changement dans les pratiques culturales et un changement dans la variété de riz ont contribué à cet effet observé, et les différentes solutions se sont montrées synergiques. Par conséquent, l'inclusion d'une variété de riz résistante dans une stratégie de gestion intégrée de *S. asiatica*, proposée précédemment par de nombreux auteurs et pour différentes cultures (Kamara et *al.*, 2008 ; Yoder et Scholes, 2010) s'est avérée utile dans ce cas.

La résistance des deux variétés NERICA à l'espèce *S. asiatica* s'est révélée être une cause majeure de la suppression de *S. asiatica* dans toutes les pratiques culturales. Bien que l'existence de différences de résistance à *S. asiatica* parmi le matériel génétique de riz ait déjà été démontrée (Johnson et *al.*, 1997; Rodenburg et *al.*, 2015, 2017), sa compatibilité avec d'autres pratiques culturales et sa synergie avec d'autres options de contrôle de *S. asiatica* sont présentées pour la première fois ici. De plus, cette étude est la première à montrer un effet positif de la résistance du riz sur les niveaux d'infestation dans la culture suivante de maïs. Par conséquent, l'utilisation de variétés résistantes semble être un composant technologique très utile dans les systèmes de rotation des cultures, où deux hôtes appropriés du même parasite sont alternés.

Une stratégie de gestion intégrée de *Striga spp* devrait idéalement réduire la banque de semences (Westerman et *al.*, 2007). Dans la présente étude, aucun effet d'interaction variété par culture n'a été observé sur le stock de semences de *S. asiatica*. Les pratiques de l'AC seules, indépendamment des espèces de plante de couverture, ont montré des augmentations de la taille de banque de semences inférieures par rapport à la pratique conventionnelle. Cependant par rapport à la situation de départ de l'expérimentation, la taille de ce stock n'a pas été réduite. Des études antérieures menées par van Mourik et *al.* (2008) ont montré un effet limité de la culture intercalaire de légumineuses sur la banque de semences de *S. hermonthica*. La production de semences de la banque de semences est due à la décomposition, à la prédation et à la germination. Avec AC, la germination est réduite, ce qui entraîne une production de semences réduite. En ce qui concerne l'approvisionnement en semences du sol, les quelques rares plants reproducteurs de *Striga* par zone infestée sont capables de reconstituer ou même d'augmenter la banque de semences (Rodenburg et *al.*, 2006).

Malgré les différences de résistance au *S. asiatica* entre les variétés de riz, le facteur variété n'a eu aucun effet significatif sur la taille du stock en graines de *S. asiatica* du sol dans le temps. L'utilisation d'une variété de plantes hôtes résistantes au *Striga* a déjà montré une diminution de la production de semences de parasites par rapport aux variétés sensibles, sans réduction concomitante de la taille de la banque de semences (Rodenburg et *al.*, 2006). Cela est principalement dû à la production prolifique de graines de *Striga*, avec une production estimée à près de 1200 graines par capsule pour *S. hermonthica* (van Delft et *al.*, 1997). Une étude de modélisation a montré qu'une diminution de la banque de semences de *Striga* ne pouvait être atteinte qu'avec des variétés présentant des mécanismes de résistance à la pré-fixation très efficaces, à savoir : faible production de stimulants de germination, ou avec une combinaison de mécanismes de résistance qui affectent le parasite à un stade ultérieur (Westerman et *al.*, 2007). Dans la présente étude, malgré la combinaison de la résistance pré-attachement (Jamil et *al.*, 2011) et post-attachement (Cissoko et *al.*, 2011) au NERICA-4, une diminution de la banque de semences n'a pas pu être atteinte. Il convient toutefois de souligner que le riz utilisé dans cette expérience, quel que soit le niveau de résistance de la variété, a été suivi chaque saison suivante par une culture de maïs sensible.

Parmi les meilleures associations de système de culture et de variété en termes de contrôle de *S. asiatica* comparé à la combinaison de B22 avec CONV (travail conventionnel du sol avec élimination des résidus de cultures), la combinaison de NERICA-4 cultivée dans les parcelles d'ACHR (culture sans travail du sol avec une intercalaire de haricot-riz et un

paillage des résidus de récolte de la précédente saison), a retardé de 19 jours en moyenne l'émergence de *S. asiatica*. Le même résultat est obtenu lorsqu'on combine les pratiques de l'AC et les variétés améliorées, dont les retards importants dans l'émergence de *S. asiatica*. Retarder le parasitisme de *Striga* s'est avéré être une stratégie importante pour réduire la biomasse globale de cette plante parasite, et par conséquent leur reproduction, et pour minimiser les pertes de récoltes induites par le *Striga* (van Ast et Bastiaans, 2006). De ce fait, cette découverte a potentiellement une grande importance pour les agriculteurs confrontés à l'infestation de *S. asiatica*.

Les observations concernant les différences entre les dates d'émergence de *S. asiatica* et les taux d'infestation rappellent aussi l'importance de l'intégration des choix de contrôle de *S. asiatica*. En utilisant uniquement une variété résistante (NERICA-4), le parasitisme peut être retardé de près de 10 jours par rapport à la variété de riz sensible (B22). Lorsque la variété NERICA-4 est combinée avec les autres stratégies, c'est-à-dire plantes de couverture, paillage des résidus de culture, semis direct, ce délai peut presque être rallongé allant jusqu'à 20 jours. De même, le passage d'une pratique conventionnelle à une pratique d'AC utilisant du haricot-riz ou de *Stylosanthes* a permis de réduire les niveaux d'infestation de 53 % et 79 % respectivement, l'utilisation de variétés de NERICA résistantes par rapport à la variété sensible B22 a réduit les niveaux d'infection de 57 % (avec NERICA-9) et de 91 % (NERICA-4). La combinaison de ces pratiques et variétés de riz a entraîné des réductions atteignant les 96 % avec NERICA-9 et NERICA-4 en milieu ACST, et 98 % avec NERICA-4 en milieu ACHR.

II.4.3. Implications des petits producteurs de céréales dans les zones exposées à l'infestation de *Striga asiatica*

Cette étude confirme l'hypothèse largement acceptée, étayée par un corpus de données relativement insuffisant (Schulz et *al.*, 2003 ; Aliyu et *al.*, 2004 ; Ellis-Jones et *al.*, 2004 ; Kamara et *al.*, 2008 ; Tesso et Ejeta, 2011), qu'une approche de gestion intégrée de *Striga* fonctionne efficacement. Il semble toutefois impossible d'obtenir un contrôle à 100%, même avec des combinaisons de technologies hautement efficaces. Pour les effets bénéfiques à long terme afin d'éviter un réapprovisionnement ou même une accumulation de la banque de semences, il est donc recommandé aux agriculteurs qui suivent cette approche de continuer à déraciner à la main, ces plantes parasites émergées avant leur floraison, et d'envisager une possibilité de mécanisation de l'arrachage, car l'arrachage manuel est un travail fastidieux.

Les petits producteurs de céréales travaillant dans des zones exposées au *Striga* pourraient être réticents à adopter les pratiques étudiées ici. Cultiver une culture intercalaire demande généralement plus de travail, pour l'établissement des cultures et la récolte. Une plante vivace comme *Stylosanthes* nécessite également du travail supplémentaire, car la culture de couverture doit être roulée ou entaillée avant la plantation de la culture suivante (voir section II.2.4.) et parfois aussi pendant la saison, afin d'éviter une concurrence indésirable avec la culture principale.

Le paillage des résidus de culture implique un compromis clair avec d'autres utilisations de la biomasse de culture, telles que l'alimentation du bétail (Naudin et *al.*, 2015b). Enfin, le niveau des rendements des cultures est un facteur important pour l'adoption de stratégies alternatives de gestion des cultures. Sur ce point, la sous-performance de l'AC est souvent médiocre, du moins dans les dix premières années après son introduction (Giller et *al.*, 2009). L'une des raisons est que les résidus de cultures céréalières ont un ratio C/N élevé, ce qui entraîne l'immobilisation de l'azote. Des apports supplémentaires (et coûteux) d'engrais minéraux semblent donc nécessaires pour compenser ce phénomène (Vanlauwe et *al.*, 2014).

Les pratiques d'agriculture de conservation doivent être adaptées aux conditions prévalant localement, afin de les rendre utiles aux petits exploitants agricoles (Knowler et Bradshaw, 2007). Le contrôle réussi de *S. asiatica* par les pratiques étudiées dans la présente étude suggère que, dans les zones où le *Striga* est une contrainte de production dominante, cette stratégie, ou ses composants, conviendra parfaitement aux petits exploitants.

II.5. Conclusion partielle

Les pratiques de l'agriculture de conservation (AC), combinant les cultures de légumineuses comme plantes de couverture et le non travail du sol ainsi qu'un paillage des résidus de récolte, retardent et réduisent l'infestation de *Striga asiatica* dans les systèmes de rotation riz-maïs. Ces pratiques ralentissent également les augmentations du stock semencier par rapport à la rotation culturale riz-maïs en mode conventionnel. *Stylosanthes guianensis* est la meilleure plante de couverture efficace pour lutter contre *S. asiatica*. Cette espèce s'est révélée également être la seule couverture capable de maintenir la biomasse des plantes adventices à des niveaux similaires et gérables que la pratique du labour conventionnel saisonnier.

La nature pérenne et la forte production de biomasse de *Stylosanthes*, lui confère un caractère suppressif des mauvaises herbes. Cela serait également l'une des raisons de la suppression efficace de *S. asiatica*. Cependant, étant donné que la pratique de l'AC avec des

espèces moins proliférantes comme *Vigna umbellata* (haricot-riz) a également permis de lutter efficacement contre *S. asiatica*, d'autres mécanismes devraient également être impliqués.

La gestion de *S. asiatica* obtenue par les pratiques agronomiques de l'AC peut être améliorée par l'intégration d'une variété de riz résistant au *S. asiatica* telle que NERICA-4. L'introduction d'une variété de riz résistante a même un effet puissant de contrôle résiduel, comme en témoigne la réduction des niveaux d'infection par *S. asiatica* dans la culture suivante de maïs. La combinaison des pratiques de l'AC et d'une variété résistante s'est toutefois révélée insuffisante pour empêcher totalement le parasitisme de *S. asiatica* et l'augmentation du stock en graines. Des mesures supplémentaires, telles que l'arrachage manuel des plantes sorties de *S. asiatica* avant la floraison, seraient ainsi nécessaires pour un contrôle efficace à long terme de cette plante parasite.

Chapitre 3 : Effets des systèmes de culture et des variétés de riz sur les performances des cultures en rotation

III-1. Introduction

Le riz (*Oryza sativa* L. et *O. glaberrima* Steud.) et le maïs (*Zea mays* L) figurent parmi les principales cultures céréalières en Afrique (Shiferaw et *al.*, 2011; Seck et *al.*, 2012). Dans les zones pluviales de haute altitude, leur culture est généralement basée sur la rotation ou l'association culturale (Balasubramanian et *al.*, 2007). Néanmoins en Afrique, leurs rendements sont faibles. En moyenne, les rendements du maïs sont compris entre 1,2 et 2,2 t.ha⁻¹ (van Ittersum et *al.*, 2016), tandis que ceux du riz pluvial vont de 1,0 à 2,5 t.ha⁻¹ (Tanaka et *al.*, 2017). La baisse de la production du riz et du maïs est principalement due au stress hydrique, à la faible fertilité du sol et à l'infestation par les plantes adventices, y compris les parasites comme *Striga spp.*, (Shiferaw et *al.*, 2011 ; Nhamo et *al.*, 2014). Ces facteurs résultent souvent de l'érosion du sol et de la monoculture sans apport d'amendement fertilisant.

Dans le centre de Madagascar, ces principales contraintes à la production de ces cultures sont rencontrées. Dans les régions de moyenne et haute altitude, les agriculteurs pratiquent la rotation du riz pluvial avec le maïs, sur des sols généralement exposés à la sécheresse, pauvres et sensibles à l'érosion hydrique (Dusserre et *al.*, 2012). Les problèmes liés au sol contribuent significativement aux pertes de rendements des systèmes de culture céréalière (Raboin et *al.*, 2016). De plus, les agriculteurs sont confrontés à de fortes infestations de *Striga asiatica* L. (Elliot et *al.*, 1993). Une récente étude de Rodenburg et *al.* (2016) a estimé que sans mesure de contrôle, *S. asiatica* entraîne une perte moyenne de 73% du rendement du riz en Afrique orientale et australe. Ces pertes peuvent aller au de-là de 80% chez le maïs, (Ransom et *al.*, 1990 ; Rusinamhodzi et *al.*, 2012).

De nombreuses pratiques agronomiques peuvent engendrer des risques de sécheresse, la baisse de la fertilité du sol, l'érosion hydrique et l'infestation de *Striga spp.* Le meilleur moyen pour diminuer l'érosion consiste à couvrir le sol par des biomasses de plantes vives ou des résidus de plantes mortes, et à réduire les perturbations dues au travail du sol (Roose et Barthes, 2001 ; Schuller et *al.*, 2007 ; Pansak et *al.*, 2008). Ces mesures contribuent également à l'amélioration de la teneur en humidité du sol (Ter Avest et *al.*, 2015). La fertilité du sol, particulièrement la teneur en carbone organique, peut être améliorée par la couverture permanente de biomasse (c'est-à-dire plante de couverture et paillage) à travers la décomposition de cette matière organique (Barthes et *al.*, 2004 ; Amado et *al.*, 2006). Cette fertilité, caractéristique croissante des plantes de couverture, pourrait être également améliorée en sélectionnant des espèces de légumineuses fixatrices d'azote, à condition que

leur efficacité ne soit pas limitée par la sécheresse, les carences en P ou en K (Vanlauwe et Giller, 2006). L'augmentation de la fertilité du sol, en particulier les niveaux d'azote du sol, peut aussi réduire le degré d'infestation et les dommages causés par *Striga spp.*, sur le riz et sur le maïs (Jamil et *al.*, 2011 ; 2012), les légumineuses en association peuvent stimuler la germination de *Striga spp.* sans être parasitées (Khan et *al.*, 2002) et elles fonctionnent ainsi comme une culture piège (Oswald et *al.*, 2002 ; van Mourik et *al.*, 2008). Les espèces de plantes de couverture qui conviennent à la conservation du sol et à l'amélioration de la fertilité sont des légumineuses fourragères comme *Mucuna pruriens* (*Mucuna*) et *Stylosanthes guianensis* (*stylo*) ; et les légumineuses à graines comme *Vigna umbellata* (haricot-riz) et *Vigna unguiculata* (niébé) (Naudin et *al.*, 2015b). Les systèmes de culture à base de *Mucuna* et niébé ont montré une réduction d'infestation de *Striga spp.* (Oswald et *al.*, 2002 ; van Mourik et *al.*, 2008 ; Kiwia et *al.*, 2009).

Le choix des variétés pourrait aussi contribuer à l'amélioration de la production agricole sur des sols sujets à la sécheresse, peu fertiles et infestés de *Striga spp.* La variation génétique sur la tolérance ou la résistance à la sécheresse (Kijoji et *al.*, 2014), sur l'efficacité de l'utilisation des nutriments ou les réponses à la fertilisation (Saito et Futakuchi, 2009), ainsi que sur la tolérance ou la résistance au *Striga spp.* (Rodenburg et *al.*, 2015 ; 2017) a été observée parmi les variétés de riz de haute altitude en Afrique. La variété NERICA-4, par exemple, résiste au stress dû à la sécheresse grâce à son enracinement profond (Menge et *al.*, 2016) et elle est résistante à *Striga spp.* (Rodenburg et *al.*, 2015). L'intégration des variétés améliorées aux pratiques agronomiques mentionnées ci-dessus pourrait conduire à des meilleures performances des cultures réalisées dans des conditions pluviales des hautes altitudes.

L'agriculture de conservation est généralement connue comme la combinaison du non travail du sol avec la couverture permanente du sol par des légumineuses en association à la culture et au paillage de résidus de culture (Scopel et *al.*, 2013). Il a été récemment montré à Madagascar qu'une approche de l'agriculture de conservation (AC) réduit le degré d'infestation de *S. asiatica* sur le riz et le maïs, en particulier lorsqu'elle est associée à une variété de riz résistante à *S. asiatica* (Randrianjafizanaka et *al.*, 2018). Toutefois, les rendements des cultures issus de l'application de cette « technique » en milieu expérimental, restent encore peu connus. On suppose que les rendements des cultures devraient être améliorés à la suite de la réduction des niveaux d'infestation par *S. asiatica* et de l'amélioration de la fertilité du sol. Pour tester cette hypothèse, quatre saisons d'expérimentations au champ ont été mises en place dans le Moyen Ouest de Madagascar.

Dans cette étude, nous avons considéré deux pratiques culturales avec une rotation riz-maïs : la première étant réalisée avec un système de culture conventionnel labouré, et la deuxième avec des systèmes de culture en agriculture de conservation associés à la culture des légumineuses. Des variétés de riz ayant des niveaux différents de résistance à *S. asiatica*, ont été utilisées dans ces pratiques. Comme résultats attendus, deux points sont à atteindre, i) les pratiques culturales ne donnent pas les mêmes rendements, et ii) elles exercent un effet différent en termes de fertilité du sol.

III-2. Matériels et méthodes

L'étude est basée sur la production des cultures, réalisée dans les milieux temporels et spatiaux du chapitre 2 (Effets des systèmes de culture et des variétés de riz sur l'infestation de *Striga asiatica* (L.) Kuntze dans des rotations culturales riz-maïs). Le même dispositif a été suivi : site d'étude, matériel végétal, dispositif expérimental, traitements comparés, dimensions des parcelles et modes de préparation du terrain et de mise en place des cultures. Néanmoins, les mesures, les observations et les traitements des données ont été différents.

III- 2.1. Traitements expérimentaux

L'expérimentation conduite en *split-plot* avec quatre pratiques culturales dans les parcelles principales et trois variétés de riz dans les parcelles secondaires, est faite en six répétitions. Les quatre pratiques culturales sont i) le riz en rotation saisonnière avec le maïs avec un labour conventionnel (CONV), ii) le riz en rotation saisonnière avec le maïs associé à une culture de niébé et de *Mucuna* (ACNM), iii) le riz en rotation saisonnière avec le maïs associé à une culture de haricot-riz (ACHR), et iv) le riz en rotation saisonnière avec le maïs associé à une culture de *Stylosanthes* (ACST). Le labour du sol est fait uniquement lors de la première saison pour les pratiques culturales ACNM, ACHR et ACST. Après cette première saison, le semis des graines de culture s'effectue directement à travers les résidus de pailis laissés dans les parcelles pour couvrir le sol. Les trois variétés de riz sont le témoin B22 et les variétés améliorées NERICA-9 et NERICA-4.

III-2.2. Mesures et observations

A la fin de chaque récolte (mai), neuf échantillons de sols (profondeur : 10 cm et volume : 196,3 cm³) ont été prélevés dans chaque parcelle de riz et de maïs. Les analyses de l'azote total, selon la méthode Kjeldahl (Bremner, 1965), et du phosphore assimilable, selon la méthode Olsen (Fardeau et al., 1988), sont issues d'une extraction d'un échantillon composite de 500 g de ce sol, séché à l'air et tamisé (à 2 mm) par parcelle.

L'érosion ou le ruissellement du sol est mesuré à la 3^{ème} saison (2013-2014), entre 67 et 130 JAS (précipitation : 444 mm). La méthode décrite par Rodenburg et *al.* (2003) a été utilisée pour cette mesure. Des pièges aux flux des eaux de ruissellement et de leurs sédiments sont constitués de bouteilles en plastique d'un diamètre de 9 cm, dont les sommets sont coupés à une hauteur de 30 cm. Ces pièges sont introduits perpendiculairement dans le sol puis ajustés autant que possible à la surface du sol, créant ainsi un petit puits de 64 cm² de surface. A l'intérieur de chaque bouteille un sac de gaze (10 × 17 cm) déposé, recueille les sédiments de sol (particules < 2 mm) entraînés par les eaux de ruissellements et draine l'eau pluviale. Deux trappes par parcelle sont installées dans 3 traitements et sur les 6 répétitions, le premier sur sol nu (CONV), le second sur une couverture intermédiaire (ACHR) et le dernier sur une couverture totale du sol (ACST). Ces pièges sont vérifiés, vidés après chaque pluie, ensuite le sol recueilli est séché à l'étuve (70°C pendant 48 heures) et pesé. Après chaque averse, ces pièges régulièrement vérifiés, sont réalignés à la surface du sol et enfoncés plus profondément dans le sol chaque fois que cela est nécessaire.

Les rendements du riz et du maïs sont évalués à la maturité des grains (Tableau 6 ; à 117-135 JAS pour le riz et à 145-160 JAS pour le maïs) dans les surfaces centrales de récolte (Voir Figure 7 et 8). Les valeurs des rendements sont obtenues grâce à la formule suivante :

$$\text{Rendement (t.ha}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Poids total (kg)} \times 10}{\text{surface (m}^2\text{)}}$$

Les données présentées sont généralement indiquées par la différence de pourcentage entre un témoin (pratique CONV et/ou la variété B22) et les facteurs étudiés (pratiques en AC et/ou les variétés NERICA). L'indice de récolte (IR) est calculé selon la formule ci-après :

$$\text{Indice récolte} = \frac{\text{Rendement en grains}}{(\text{Rendement en grains} + \text{Rendement en pailles})}$$

Tableau 6 : Dates de récolte des céréales pendant les expériences de la saison 1 à 4 (S1-S4) pour toutes les cultures.

Cultures	S1 (2012)	S2 (2013)	S3 (2014)	S4 (2015)
Riz	2-6 et 10-11 Avril	21-22, 25-27 Mars	19-21, 24-25, 31 Mars	31 Mars et 1-2, 7 Avril
Maïs	28-29 Mai	30 Avril, 2 Mai	6-8 Avril	29-30 Avril
Niébé	9, 18 Mars	20 Fév. ; 13 Mars	8 Mars ; 10 Avril	13, 24 Fév. ; 16 Mars
Haricot-riz	Pas de récolte	24 Août	Pas de récolte	Pas de récolte

Les panicules de riz sont coupées et battues à la main. Ensuite, les grains sont vannés et séchés à l'air pendant 5 jours. Afin de convertir le poids des grains de riz en teneur de 14%

d'humidité, un humidimètre numérique de grains SATAKE (modèle SS-7) mesure simultanément le poids des grains ainsi que leur teneur en humidité. Pour le rendement des grains de maïs, seuls les épis sont récoltés et l'égrenage est fait manuellement, suivis d'un séchage à l'air pendant 5 jours puis pesés. Le poids et la teneur en humidité des grains de maïs sont évalués comme pour le riz. Puis ils sont convertis aussi à 14 % d'humidité.

Les poids secs des biomasses de céréales et de légumineuses sont notés juste après les récoltes de grains dans les mêmes surfaces. Comme les biomasses de niébé, de *Mucuna* et de haricot-riz ont été liées avec celle du maïs, de même, pour l'évaluation de la biomasse des systèmes de culture ACNM et ACHR, à la récolte, toutes les matières végétales (maïs et légumineuses) ont été combinées. Dans les autres parcelles, la biomasse du maïs (dans les parcelles CONV et ACST) et celle de *Stylosanthes* (parcelles ACST) sont mesurées séparément, en même temps que celles du poids sec de la biomasse dans les parcelles de ACNM et ACHR. Comme la biomasse de *Stylosanthes* était trop volumineuse pour être estimée sur l'ensemble de la surface de récolte, elle est ainsi réalisée à partir d'un quadra de 1 m² représentatif de la parcelle, placé au hasard dans chaque surface de récolte. Les biomasses de *Stylosanthes* du système maïs sont prélevées dans la même surface pour chaque parcelle, puis mélangées pour pouvoir les comparer aux autres traitements.

Après séchage à 60°C pendant 48 heures à l'étuve, les échantillons de matières sèches sont broyés. Pour chacun d'eux (riz, maïs et légumineuses), 300 g de matières broyées ont été prélevés à la fin de la 4^{ème} saison (avril-août 2015) pour l'analyse de N total et du P assimilable (Tableau 7).

Tableau 7 : Teneur en azote et en phosphore (en %) de la biomasse, des différentes variétés de riz et des espèces cultivées (avril-août 2015).

Type de biomasse	N	P
Riz variété B22	0,8	0,03
Riz variété NERICA-4	0,7	0,03
Riz variété NERICA-9	0,8	0,03
Maïs	1,0	0,11
Niébé	2,1	0,11
<i>Mucuna</i>	2,9	0,14
Haricot-riz	3,2	0,16
<i>Stylosanthes</i>	2,9	0,14

N : azote et P : phosphore

III-2.3. Analyses des données

Toutes les données ont été vérifiées pour l'homoscédasticité et la normalité d'après Sokal et Rohlf (1995) avant l'analyse. Ensuite, elles ont été soumises à l'analyse de la variance (ANOVA) en utilisant un modèle mixte, les moyennes ont été comparées suivant le test LSD de Fisher. Ces analyses de données ont été effectuées avec le logiciel statistique XLSTAT version 2014.5.03 (MS Excel, 2014).

III-3. Résultats

III-3.1. Rendement des grains de riz et de biomasse

Les rendements en grains et la biomasse de la paille de riz ont significativement subi les effets principaux de la saison de culture, des pratiques culturales et de la variété, ainsi que l'interaction des effets de la saison \times pratiques culturales, de la campagne \times variété et des pratiques culturales \times variété (Tableau 8). Les rendements moyens par saison de riz ont été compris entre 1,9 à 3,5 t.ha⁻¹ avec un indice de récolte (IR) de 0,45 à 0,57. La 3^{ème} saison a donné les meilleurs rendements moyens de riz (3,5 t.ha⁻¹, IR= 0,57). En comparant les pratiques culturales entre les saisons, le meilleur rendement (3,9 t.ha⁻¹, IR= 0,57) est enregistré avec ACNM en saison 3. Après des bas rendements en riz au cours des deux premières saisons de culture, le système avec *Stylosanthes* (ACST) a présenté des rendements similaires à ceux d'ACNM (4,2 t.ha⁻¹, IR= 0,62) pendant la 3^{ème} campagne et des rendements plus élevés en saison 4. Les systèmes ACST et ACNM ont obtenu de rendements en riz significativement plus élevés, 4,05 t.ha⁻¹ (IR= 0,62 et 0,58 respectivement) en moyenne, que le système conventionnel (CONV) (3,2 t.ha⁻¹, IR= 0,56) et la pratique de l'AC avec le haricot-riz (ACHR) (2,7 t.ha⁻¹, IR= 0,54) en saison 3. Durant la 4^{ème} saison, le rendement en riz de ACST a eu un résultat significativement plus élevés de 24,4 %, tandis que les trois autres pratiques avaient eu des rendements similaires, de l'ordre de 2 t.ha⁻¹.

Le facteur saison de la matière sèche des pailles de riz ont donné un rendement moyen allant de 1,6 à 2,6 t.ha⁻¹ (Tableau 8). Les plus fortes biomasses de paille ont été produites pour les saisons 2 (2,4 t.ha⁻¹) et 3 (2,6 t.ha⁻¹). En reproduisant les rendements en grains de riz, la production de biomasse de paille de riz sous ACST a été faible au cours des deux premières saisons de culture (environ 1 t.ha⁻¹), mais elle a été similaire aux autres pratiques en 3^{ème} et 4^{ème} saison de culture. Les poids moyens élevés en matières sèches ont été obtenus avec ACNM (2,3 t.ha⁻¹) et CONV (2,2 t.ha⁻¹).

Tableau 8 : Rendements par saison culturale (S1-S4) du riz et de la biomasse de ses pailles (t.ha⁻¹)

	Rendement des grains de riz (t.ha ⁻¹)					Biomasse des pailles de riz (t.ha ⁻¹)				
	S1 ¹	S2	S3	S4	Moyenne	S1	S2	S3	S4	Moyenne
CONV	1,8 f ²	2,1 ef	3,2 b	2,0 f	2,3 B	1,6 ef	2,9 b	2,5 cd	1,9 e	2,2 A
ACNM	1,9 f	3,2 bc	3,9 a	2,1 f	2,8 A	1,6 ef	3,4 a	2,8 bc	1,4 f	2,3 A
ACHR	2,1 f	2,2 ef	2,7 cd	1,8 f	2,2 B	1,7 ef	2,7 bc	2,3 c	1,4 f	2,1 B
ACST	1,7 f	0,58 g	4,2 a	2,6 de	2,3 B	1,4 f	0,69 g	2,6 bcd	1,6 ef	1,6 C
Moyenne	1,9 Y ⁴	2,0 Y	3,5 X	2,1 Y	2,4	1,6 Y	2,4 X	2,6 X	1,6 Y	
B22	1,8 d	2,0 cd	2,9 b	1,9 cd	2,1 B	1,8 de	3,1 a	2,2 c	2,1 c	2,3 A
NERICA-9	1,8 cd	2,0 cd	3,7 a	2,2 cd	2,4 A	1,6 ef	2,0 cd	2,9 ab	1,3 f	2,0 B
NERICA-4	2,0 cd	2,1 cd	4,0 a	2,2 c	2,6 A	1,4 f	2,1 c	2,6 b	1,3 f	1,9 B
	CONV	ACNM	ACHR	ACST		CONV	ACNM	ACHR	ACST	
B22	1,7 e	2,5 bcd	2,2 cd	2,2 cd		2,3 bc	2,7 a	2,5 ab	1,8 e	
NERICA-9	2,5 bc	2,9 ab	2,1 de	2,2 cd		2,3 bc	2,2 bcd	1,9 de	1,5 f	
NERICA-4	2,6 abc	3,0 a	2,3 cd	2,4 cd		2,2 bcd	2,0 cde	1,8 e	1,4 f	
Source	ddl	F	P	SED		ddl	F	P	SED	
S	3	73,6	<0,0001	0,124		3	75,2	<0,0001	0,088	
PC	3	4,8	0,02	0,124		3	11,8	0,0003	0,088	
V	2	8,2	0,0004	0,108		2	19,1	<0,0001	0,076	
S × PC	9	15,8	<0,0001	0,248		9	23,3	<0,0001	0,175	
S × V	6	2,6	0,02	0,215		6	14,5	<0,0001	0,152	
PC × V	6	2,2	0,04	0,215		6	2,2	0,05	0,152	
S × PC × V	18	0,75	0,76	-		18	1,4	0,12	-	

1. Au cours de la première saison, à l'exception de ACST, toutes les cultures ont été uniquement que du riz ;

2. Les moyennes suivies de lettres différentes sont significativement différentes selon le test LSD ($P < 0,05$).

Les quatre pratiques culturales - rotation du maïs conventionnelle et labour (CONV), maïs-niébé et *Mucuna* sans labour (ACNM), maïs haricot-riz en culture sans labour (ACHR), maïs-*Stylosanthes* sans labour (ACST) - et trois variétés de riz - B22, NERICA-4, NERICA-9. Source de variation ANOVA (Saison: S ; Pratiques culturales: PC ; Variété: V et interactions): degrés de liberté (ddl), valeurs F (test de Fisher) et P (probabilité) et différence des erreurs standard de (SED).

Les deux variétés de NERICA ont significativement produit des rendements en grain de riz plus élevés de 16 % que la variété témoin locale B22 (Tableau 8). Cela n'a été vrai que pendant la saison 3, lorsque ces variétés ont été comparées par saison. Pour les paillis de riz, une inversion de la situation a été observée avec une production de biomasse plus élevée de 13 %, globalement significative que celle des variétés NERICA. Les variétés NERICA-4 et NERICA-9 ont été significativement plus productives, de 33 % ($IR = 0,52$ et $0,55$ respectivement), que B22 ($IR = 0,43$), sous le système CONV, puis NERICA-4 a aussi produit des rendements significatifs plus élevés, de 16,7 % ($IR = 0,60$) que B22 ($IR = 0,48$) après le maïs en ACNM. Aucune différence n'a été observée entre les rendements en graines des variétés sous les pratiques avec ACST et haricot-riz (ACHR). La variété B22 a donné une biomasse significativement plus élevée que les deux variétés de NERICA des pratiques culturales ACNM, ACHR et ACST, respectivement 22 %, 26 % et 19,5 %. La production de biomasse des deux variétés NERICA a été similaire, en moyenne 2 t.ha^{-1} .

III.3.2. Rendements du maïs et des légumineuses et biomasse

Les rendements de maïs en grains et en biomasses sèches et ceux de légumineuses ont montré des effets significatifs par rapport à la saison de culture, aux pratiques culturales et aux interactions de la saison avec les pratiques culturales (Tableau 9). L'évaluation des arrières effets de la variété de riz sur ces rendements a été obtenue sur les données de la 2^{ème} à la 4^{ème} saison. Aucun effet n'a été observé ni sur les variétés principales : Variété ($P_{\text{rendement en grains}} = 0,70$; $P_{\text{biomasse}} = 0,62$), ni sur son interaction avec la saison et la pratique culturale : variété \times saison ($P_{\text{rendement en grains}} = 0,12$; $P_{\text{biomasse}} = 0,59$), de même pour l'interaction variété \times pratique culturale ($P_{\text{rendement en grains}} = 0,95$; $P_{\text{biomasse}} = 0,93$) ou encore pour l'interaction variété \times campagne \times pratique culturale ($P_{\text{rendement en grains}} = 0,21$; $P_{\text{biomasse}} = 0,51$).

Les rendements en grains de maïs ont varié de $0,39 \text{ t.ha}^{-1}$ en 3^{ème} saison à $1,1 \text{ t.ha}^{-1}$ en 4^{ème} saison (Tableau 9). Au cours de ces saisons culturales, les rendements en maïs obtenus avec CONV et ACHR ont été significativement supérieurs de 37,5 % et 50 % à ceux obtenus avec ACNM et ACST. Les rendements moyens en maïs obtenus avec ACST ont été significativement inférieurs de 40 % à ceux obtenus avec les autres pratiques culturales. Dans la pratique conventionnelle, sauf en saison 3, les rendements ont été relativement constants, environ 1 t.ha^{-1} , alors que pour le cas de l'ACHR, les rendements du maïs ont augmenté à chaque saison de $0,45 \text{ t.ha}^{-1}$ à $1,3 \text{ t.ha}^{-1}$.

Tableau 9 : Rendements par saison culturale (S1-S4) de maïs et de biomasse de couverture de maïs

	Rendements des grains de maïs (t.ha ⁻¹)										Biomasses des maïs et des légumineuses (t.ha ⁻¹)									
	S1 ¹		S2		S3		S4		Moyenne		S1		S2		S3		S4		Moyenne	
CONV	0,70	cd	1,1	ab ¹	0,39	e	1,1	ab	0,8	A	1,8	fg	3,0	ef	1,6	g	1,9	fg	2,1	Z
ACNM	0,09	fg	0,27	ef	0,38	e	1,2	a	0,5	B	1,4	g	3,0	ef	3,9	de	1,8	fg	2,5	Z
ACHR	0,54	de	0,70	d	0,77	cd	1,3	a	0,8	A	5,0	d	4,6	d	4,5	d	2,9	ef	4,3	Y
ACST	0,48	de	0	g	0,01	g	0,94	bc	0,4	C	2,4	efg	24,4	a	11,8	b	7,8	c	11,6	X
Moyenne	0,451	XY	0,52	Y	0,39	Z	1,1	X	0,68		2,6	D	8,8	A	5,4	B	3,6	C		
Source	ddl		F		P				SED		ddl		F		P				SED	
S	3		83,5		<0,0001				0,057		3		104,2		<0,0001				0,360	
PC	3		4,3		0,0223				0,057		3		138,7		<0,0001				0,360	
S × PC	9		9,5		<0,0001				0,114		9		68,8		<0,0001				0,721	

¹ Les moyennes suivies de lettres différentes sont significativement différentes selon le test LSD ($P < 0,05$).

Les 4 saisons culturales de l'expérimentation : S1-S4,

Les quatre pratiques culturales (CP) : rotation du maïs conventionnelle et labour (CONV). maïs-niébé et *Mucuna* sans labour (ACNM), maïs-haricot-riz sans labour (ACHR), maïs-*Stylosanthes* sans labour (ACST).

Source de variation ANOVA (saison: S ; Pratique culturale: PC et interactions: degrés de liberté (ddl), valeurs F (test de Fisher) et P(probabilité) et de différences des erreurs standards (SED).

Les rendements des légumineuses à grain, telles que le niébé et le haricot-riz ont été aussi variables. Pour les grains de niébé, ces rendements sont de 0,09 t.ha⁻¹ à la 1^{ère} saison culturale, puis 0,17 t et 0,19 t.ha⁻¹, respectivement, pour S2 et S3, qui sont significativement plus élevés ($F = 3,9$; $P = 0,03$; $SED = 0,03$). Au cours de la S4, on a eu un rendement de 0,14 t.ha⁻¹. En ce qui concerne le haricot-riz, la production des grains n'a eu lieu qu'en 2^{ème} saison avec un rendement de 0,02 t.ha⁻¹. Comme pour la production de grains de maïs, la biomasse des cultures a été variable en fonction des saisons et des pratiques culturales, allant de 1,4 t.ha⁻¹ avec ACNM pendant la saison 1 à 24,4 t.ha⁻¹ sous ACST en saison 2 (Tableau 9). Pour les quatre saisons culturales, les biomasses pour ACST et ACHR ont été toujours supérieures, respectivement de 80,2 % et 46,5 %, comparées à celles de CONV et ACNM, avec une production de biomasse hautement significative de ACST que les autres pratiques culturales. Au cours des quatre saisons culturales, aucune tendance visible n'a été observée sur les variations de la production des biomasses.

En 4^{ème} saison de culture, une fertilisation à base de phosphore a été introduite comme facteur de traitement supplémentaire. La fertilisation au phosphore a eu un effet hautement significatif ($P < 0.0001$) tant sur les rendements en maïs que sur la biomasse maïs-légumineuses (Tableau 10). La fertilisation au phosphore a augmenté les rendements de grains de maïs de 1,1 t.ha⁻¹ à 1,6 t.ha⁻¹ et la biomasse des cultures de 2,0 t.ha⁻¹ à 2,4 t.ha⁻¹. Des effets significatifs de la production de biomasse de maïs et des légumineuses ont été obtenus sur l'interaction pratique culturale × Phosphore, sur l'interaction Variété × Phosphore et enfin sur l'interaction Pratiques culturales × Variété × Phosphore (Tableau 10). Les cultures en ACST et CONV en association avec ajout de phosphore, n'ont pas donné d'effet significatif sur la production de biomasse, alors que les pratiques avec ACNM et ACHR, ont montré des augmentations significatives. Dans les parcelles cultivées précédemment de NERICA-9, la biomasse des maïs-légumineuses ont bénéficié de manière significative de l'engrais phosphaté.

Tableau 10 : Rendement en maïs (a) et biomasse de couverture de maïs (b), en t.ha⁻¹, de la 4^{ème} saison culturale

5a		Rendement des grains de maïs (t.ha ⁻¹)				
		CONV	ACNM	ACHR	ACST	Moyenne
	B22	1,6 a ¹	1,5 a	1,4 ab	1,2 bc	
	NERICA-9	1,2 bc	1,7 a	1,6 a	1 c	
	NERICA-4	1,2 bc	1,5 a	1,7 a	1,2 bc	
	P+					1,6 a
	P-					1,1 b
	Moyenne	1,3	1,6	1,6	1,1	
Source		ddl	F	P		SED
Pratique culturale (CP)		3	1,4	0,29		
Variété (V)		2	0,45	0,64		
Fertilisation (F)		1	71,7	<		0,693
PC x V		6	2,4	0,03		0,856
PC x F		3	1,8	0,15		
V x F		2	1,0	0,37		
PC x V x F		6	1,2	0,33		
5b		Biomasses de maïs et de légumineuses (t.ha ⁻¹)				
		CONV	ACNM	ACHR	ACST	Moyenne
P+	B22	2,6 fghi	2,7 fgh	3,9 e	7,2 cd	4,1 AB
	NERICA-9	2,5 fghij	3,3 ef	4,0 e	8,2 ab	4,5 A
	NERICA-4	2,2 ghij	2,6 fghi	4,0 e	7,4 bc	4,0 B
P-	B22	1,9 hij	1,7 ij	2,8 fg	8,2 ab	3,7 BC
	NERICA-9	1,9 hij	1,9 hij	3,0 fg	6,5 d	3,3 C
	NERICA-4	1,8 ij	1,9 hij	3,1 f	8,8 a	3,9 B
P+		2,4 xy	2,9 x	4,0 w	7,6 v	4,2 Y
P-		1,9 yz	1,8 z	2,9 x	7,8 v	3,6 Z
	Moyenne	2,1 Z	2,4 Z	3,5 Y	7,7 X	
Source		ddl	F	P		SED
Pratique culturale (CP)		3	72,9	< 0,0001		0,18
Variété (V)		2	0,13	0,8818		
Fertilisation (F)		1	22,7	< 0,0001		0,13
PC x V		6	1,3	0,2704		
PC x F		3	5,7	0,0012		0,25
V x F		2	6,0	0,0036		0,22
PC x V x F		6	3,4	0,0047		0,44

¹ Les moyennes suivies de lettres différentes sont significativement différentes selon le test LSD ($P < 0,05$).

Les quatre pratiques culturales (PC) : une rotation conventionnelle et travail du sol (CONV), culture de : maïs-niébé et *Mucuna* sans labour (ACNM), maïs-haricot-riz sans labour (ACHR), maïs-*Stylosanthes* sans labour (ACST)

Les trois variétés de riz précédentes (V) : B22, NERICA-9, NERICA-4,

Les deux niveaux de fertilisation phosphorée (F): avec phosphore (P +), sans phosphore (P-).

Sortie ANOVA sur le rendement en grain de maïs et des cultures intercalaires pendant la 4^{ème} saison par pratique culturale (PC), variété de riz de la précédente saison (V), fertilisation phosphatée (F) et leurs interactions.

CONV: système de culture conventionnelle

ACNM : système de culture en agriculture de conservation avec association de niébé et de *Mucuna*

ACHR : système de culture en agriculture de conservation avec association de haricot-riz

ACST: système de culture en agriculture de conservation avec association de *Stylosanthes*

B22 : variété brésilienne

NERICA-9 : new rice for africa

NERICA-4 : new rice for africa

P+: fertilisation au phosphore

P-: fertilisation sans ajout de phosphore

III-3.3. Variation de la fertilité et de l'érosion du sol selon les pratiques culturales

Des différences significatives de la teneur en azote total des 10 premiers cm de sol ont été observées avec la saison culturale, les pratiques culturales et leur interaction (Tableau 11). En saison 3 et 4, les teneurs en azote total du sol ont été significativement plus élevées, respectivement de 35,7 % et 15,8 %, par rapport aux deux premières saisons S1 et S2 (1,43 g.kg⁻¹ et 1,40 g.kg⁻¹). Les systèmes de culture en AC sous les couvertures de haricot-riz (ACHR) ou de *Stylosanthes* ont montré de taux d'azote total du sol significativement plus élevé de 5,9 % et 11,8 %, comparés à la pratique culturale témoin conventionnel (CONV). À partir de la 2^{ème} saison, les teneurs en azote (N) total du sol ont été plus élevées, de 10 % à 19 %, seulement sous ACST que sous CONV. La pratique culturale n'a pas influencé la teneur en phosphore (P) assimilable du sol ; seulement des impacts significatifs sur la saison ont été montrés. Par rapport à la 1^{ère} saison, les niveaux de P-assimilables ont été significativement plus bas pour la 2^{ème} et 3^{ème} saison, mais significativement plus élevés pour la 4^{ème} saison (Tableau 11).

Des effets significatifs des pratiques culturales ($F = 12,44$; $P < 0,001$; $SED = 88,38$) ont été observés sur l'érosion du sol durant les 9 semaines de mi- saison (après une précipitation de 444 mm). Sous le système de culture conventionnel, une moyenne 420,8 g de sol par piège a été recueilli, alors que sous la pratique de l'AC avec le haricot de riz (ACHR), il n'y a eu que 91,8 g.piège⁻¹ de sol et de 2,3 g.piège⁻¹ avec *Stylosanthes* (ACST). L'estimation des érosions de sol entre ACHR et ACST, n'a montré aucune différence significative.

III-4. Discussion

Brouder et Gomez-Macpherson (2014) ont observé un manque de preuves générales venant d'une expérience à long terme bien conçue sur les avantages des pratiques de l'agriculture de conservation (AC). La présente étude montre les résultats d'une expérience de quatre saisons culturales continues comparant une rotation riz-maïs en culture conventionnelle (avec travail du sol et élimination des résidus de cultures), avec des rotations riz-maïs selon les principes de l'AC, où i) le sol n'est pas perturbé sauf pour la préparation du sol de la première saison, ii) les résidus de culture sont laissés à la surface du sol sous forme de paillis (RCP), et iii) les principales cultures vivrières sont en intercalaires pendant tout ou partie des cycles de la rotation.

Tableau 11 : Teneur en N-total et P-assimilable pendant les 4 saisons (S1-S4) dans les parcelles de riz et de maïs sans ajout de Phosphore.

	N-totale (g.kg ⁻¹)					P-assimilable (mg.kg ⁻¹)				
	S1	S2	S3	S4	Moyenne	S1	S2	S3	S4	Moyenne
CONV	1,43	efg ¹	1,31	fg	2,07	b	1,53	de	1,58	C
ACNM	1,46	ef	1,28	g	2,24	a	1,67	d	1,66	BC
ACHR	1,39	efg	1,49	e	2,20	ab	1,65	d	1,68	B
ACST	1,45	ef	1,51	de	2,31	a	1,89	c	1,79	A
Moyenne	1,43	Z	1,40	Z	2,20	X	1,68	Y	1,68	
Source	ddl	F	P		SED	ddl	F	P		SED
S	3	171,2	< 0,0001		0,040	3	52,2	< 0,0001		0,095
PC	3	9,0	< 0,0001		0,040	3	2,2	0,09		
S x PC	9	2,0	0,04		0,080	9	0,58	0,81		

¹ Les moyennes suivies de lettres différentes sont significativement différentes selon le test LSD ($P < 0,05$).

Les 4 saisons (S1-S4) dans les parcelles expérimentales de riz et de maïs sans application de Phosphore,

Les quatre différentes pratiques culturales (PC), la rotation et labour conventionnels (CONV), maïs-niébé et *Mucuna* sans labour (ACNM), maïs-haricot-riz sans labour (ACHR), maïs-*Stylosanthes* sans labour.

ANOVA à la fois sur les paramètres sol par saison (S), par pratique culturale (PC) et de leurs interactions.

N-totale : Azote totale du sol

P-assimilable : Phosphore assimilable du sol

PC : pratiques culturales

CONV: système de culture conventionnelle

ACNM : système de culture en agriculture de conservation avec association de niébé et de *Mucuna*

ACHR : système de culture en agriculture de conservation avec association de haricot-riz

ACST : système de culture en agriculture de conservation avec association de *Stylosanthes*

Cette étude a été réalisée dans des conditions où les pratiques de l'AC sont supposées être bénéfiques et performantes : systèmes de production des cultures sur sol pauvre, vulnérable, et à texture légère sur un paysage vallonné dans un climat tropical avec des précipitations extrêmes (Bruelle et *al.*, 2015). Dans ce cas, les sols sont également infestés par la plante parasite *Striga asiatica*. Les pratiques de l'AC décrites ci-dessus ont montré qu'elles réduisaient les niveaux d'infestation de *S. asiatica* par rapport à la pratique de rotation culturale conventionnelle (Randrianjafizanaka et *al.*, 2018), avec de grands effets de variété confirmant la sensibilité de la variété B22 à *S. asiatica* et la résistance de NERICA-4. La question est de savoir également si les pratiques de l'AC bénéficient à la gestion des sols et à la productivité des cultures qui sont l'objet de la présente étude. Cette expérimentation permet une comparaison équitable entre les pratiques conventionnelles des agriculteurs (CONV) et les pratiques de l'AC. La seule différence entre ces deux pratiques réside sur les principes de l'AC (culture sans labour, RCP et plantes de couverture), cependant les autres facteurs étudiés (variétés, fertilisation) restent les mêmes. Ce n'est souvent pas le cas dans les études de l'AC, ce qui a pour effet de biaiser les systèmes conventionnels par rapport à ceux de l'AC, comme l'ont observé Giller et *al.* (2009 ; 2011).

III-4.1. Avantages de la gestion des systèmes de cultures et des variétés sur la production des graines

La présente étude a montré que les avantages à court terme des pratiques culturales de l'AVEC pourraient être atteints, contrairement aux études précédentes réalisées à Madagascar (Dusserre et *al.*, 2012 ; 2017). En effet, dès la S2 et S3, l'AC a permis d'augmenter les rendements en riz qui passent de 3,2 t.ha⁻¹ à 3,9 t.ha⁻¹ avec niébé-*Mucuna* et de 0,58 t.ha⁻¹ à 4,2 t.ha⁻¹ avec *Stylosanthes*. La plupart des rendements élevés, comparés à la pratique traditionnelle, ont été obtenus avec les cultures en AC avec niébé - *Mucuna* comme cultures de couverture. Lorsque *Stylosanthes* a été utilisé comme plante de couverture, les améliorations de rendement n'ont été obtenues qu'à partir de la 3^{ème} et 4^{ème} saison. Au cours de la 2^{ème} saison, les rendements du riz ont chuté de manière spectaculaire avec *Stylosanthes*, probablement parce que ses bienfaits tels que le contrôle de *S. asiatica*, l'augmentation de l'azote dans le sol n'ont pas encore dépassé les contraintes causées par la concurrence interspécifique accrue. *Stylosanthes* produit de grandes quantités de biomasse et nécessite donc une gestion attentive lors de la culture intercalaire avec une culture céréalière. Cela est particulièrement vrai pour le riz, qui est un concurrent faible (van Heemst, 1985). Les fortes baisses observées sur les rendements de riz, en association avec *Stylosanthes* (en S2),

confirment les conclusions de Saito et *al.* (2006) qui ont signalé une réduction de 55 % du rendement du riz lorsque *Stylosanthes* était semé à la même période que le riz. Ce qui est le cas, car les repousses de plants de *Stylosanthes* en S2 après la culture de maïs ont déjà eu un avance par rapport aux jeunes plants de riz.

Les rendements moyens obtenus en riz vont de 2,2 t.ha⁻¹ à 2,8 t.ha⁻¹ alors que à l'échelle régionale, ils varient de 1,0 t.ha⁻¹ à 2,5 t.ha⁻¹ (Tanaka et *al.*, 2017). Les rendements en riz ont été significativement plus élevés avec NERICA-9 et NERICA-4, par rapport à B22, notamment pendant la saison 3. Comme cette saison présentait globalement des taux d'infestation en *S. asiatica* supérieurs à ceux des autres saisons, une différence nette dans les niveaux d'infestation entre ces variétés a été obtenues (Randrianjafizanaka et *al.*, 2018), la résistance à *S. asiatica* semble être une raison plausible pour ces rendements élevés de NERICA. Des corrélations positives entre les rendements en riz et la résistance ont déjà été observées (Rodenburg et *al.*, 2017). Fait intéressant, les différences de rendement entre les variétés étaient plus prononcées dans la gestion des cultures conventionnelles. Lorsque les pratiques de l'AC ont été appliquées, ces différences entre les rendements variétaux ont été réduites (dans le cas de l'ACNM) ou même entièrement homogénéisées (ACHR et ACST). Cela est probablement dû au fait que les niveaux de *S. asiatica* dans ces systèmes ont été fortement réduits, en particulier avec les pratiques en ACHR et en ACST (Randrianjafizanaka et *al.*, 2017), éliminant ainsi l'avantage de rendement dérivé de la résistance variétale au *S. asiatica*.

Les rendements du maïs étaient très faibles, moins de 1 t.ha⁻¹, durant les quatre saisons culturales et pour tous les systèmes de culture. En effet, les rendements moyens en grain de maïs dans cette étude vont de 0,4 t.ha⁻¹ pour ACST à 0,8 t.ha⁻¹ pour ACHR qui sont inférieurs aux moyennes de l'échelle régionale allant de 1,2 à 2,2 t.ha⁻¹ (van Ittersum et *al.*, 2016). Ces faibles rendements peuvent s'expliquer, au moins en partie, par les faibles niveaux de fertilité des sols évoqués précédemment, en particulier en ce qui concerne le phosphore (P) du sol (2,21 mg.kg⁻¹). La relation de cause à effet entre les faibles teneurs en P et les faibles rendements en maïs ressort clairement des améliorations significatives du rendement en grains après la fertilisation au phosphore supplémentaire. Encore une fois, cela confirme les suggestions précédentes (Nyamangara et *al.*, 2013 ; Vanlauwe et *al.*, 2014) selon lesquelles une application supplémentaire d'engrais serait un élément nécessaire de l'AC, afin de garantir la durabilité et la rentabilité. Contrairement aux découvertes récentes de Masvaya et *al.* (2017) avec la culture intercalaire du maïs et du niébé, les rendements de la présente étude ont été généralement réduits lorsque le maïs a été intercalé avec une culture de couverture de

légumineuses, malgré de légères améliorations des teneurs en azote et des réductions significatives des traitements (Randrianjafizanaka et *al.*, 2018). Par ailleurs, une variété de riz résistant à *Striga* (NERICA-4) n'a pas eu d'effet positif sur les rendements du maïs. Ceci est remarquable car la résistance à *S. asiatica* pour le riz a montré, dans cette rotation, un fort effet à long terme sur le degré d'infestation à *S. asiatica* de la culture de maïs suivante (Randrianjafizanaka et *al.*, 2018). Apparemment, en faible fertilité inhérente, cette étude a masqué les effets positifs des cultures de couverture sur les rendements de maïs dans une combinaison avec une compétition interspécifique accrue.

Les rendements des légumineuses à graines, niébé et haricot-riz ont été extrêmement faibles (niébé) à nul (haricot-riz). Ceci est une préoccupation pour la viabilité et l'attractivité des systèmes de culture qui incluent ces cultures. En effet, les agriculteurs sont moins enclins à adopter des plantes de couverture qui n'ont que des effets bénéfiques sur le sol (Vanlauwe et Giller, 2006) ou ne ciblent qu'une seule contrainte de la production (Becker et Johnson, 1999). Il faudrait ainsi promouvoir l'intégration agriculture-élevage afin de valoriser les légumineuses qui pourrait avoir une qualité et valeur fourragère intéressante. Néanmoins, les légumineuses à graines sont souvent préférées aux engrais verts car elles contribuent également à la production d'aliments ou de revenus pour l'agriculteur (Giller, 2001). La difficulté de la production en graines de ces légumineuses dans des conditions spécifiques de ce champ légitime la proposition de Giller et *al.* (2011) pour déterminer quelle légumineuse correspond le mieux à un système de culture locale donné, tant en termes de critères techniques que socio-économiques. Le faible rendement des légumineuses et du maïs peut être dû à la faible fertilité inhérente du sol. La faible fertilité du sol a été identifiée comme l'une des principales contraintes à la réussite des pratiques de l'AC, car elle limite la production de résidus de culture et entrave également le rendement des légumineuses (Giller et *al.*, 2011). Des rendements médiocres des cultures pourraient également être une indication de l'adaptation environnementale sous-optimale des variétés utilisées. Les futures recherches sur les pratiques de AC rentables devraient donc non seulement examiner les espèces les mieux adaptées, mais également les variétés de cultures et les plantes de couverture les mieux adaptées.

Les avantages à court termes de l'application de l'AC peuvent être atteints, d'après les résultats de cette étude. Ce qui est contraire à notre conclusion partielle selon laquelle la durée de l'étude ne suffisait pas pour bien apprécier l'avantage de la pratique de l'AC.

Les rendements des cultures peuvent être considérés comme le principal indicateur des performances des pratiques culturales et un facteur important pour l'adoption de nouvelles

stratégies par les petits exploitants (Snapp et *al.*, 1998). Les pratiques de l'AC n'étaient pas toujours plus productives que la pratique conventionnelle. L'expression des avantages de rendement constants de l'AC peut prendre jusqu'à 15 ans (Rusinamhodzi et *al.*, 2011), ce qui peut être particulièrement vrai sur les sols dégradés (Giller et *al.*, 2011). Par conséquent les données de recherche des quatre saisons expérimentales peuvent ne pas être suffisantes pour montrer tout le potentiel de ces pratiques. Cela plaiderait pour des enquêtes à plus long terme. D'un autre côté, les agriculteurs, qui dépendent chaque année de récoltes rentables, ne sont peut-être pas aussi patients que les chercheurs en agronomie.

III.4.2. Bénéfices apportés par la biomasse, les couvertures sur la fertilité du sol

La présente étude montre que les érosions hydriques du sol sont minimisées lorsque le semis direct est combiné avec les plantes de couverture et la RCP, ce qui confirme les recherches antérieures de Pansak et *al.* (2008) et Schuller et *al.* (2007). L'efficacité semble dépendre de la quantité de biomasse de RCP (résidus de culture laissés à la surface du sol sous forme de paillis) telle que l'a stipulée Erenstein (2002). Bien qu'aucune différence significative n'ait été observée entre les types de cultures de couverture, la pratique culturale avec une biomasse la plus élevée (ACST) et supposée ayant la plus grande quantité de RCP a présenté les taux d'érosion de sol les plus bas, tandis que la production de biomasse intermédiaire (sous ACHR) a donné des ruissellements intermédiaires. Entre la 2^{ème} et la 4^{ème} saison, la combinaison maïs - haricot-riz (ACHR) a produit 1,5 à 2,8 fois la quantité de biomasse de maïs seule dans les pratiques conventionnelles (CONV), ce qui a entraîné un taux de ruissellement 4,6 fois plus faible dans la saison 4. La combinaison maïs - *Stylosanthes* (ACST) a produit 4,1 à 8,1 fois plus de biomasse que sur CONV au cours de ces trois saisons, entraînant une diminution du ruissellement de sol de 183 fois. La pratique ACST a également produit 2,6 à 5,3 fois plus de biomasse que le ACHR, ce qui a entraîné une baisse du ruissellement du sol de 40 fois. La présence de biomasse suffisante, vivante et morte, sur le champ est considérée comme un élément vital de l'AC car elle contribue non seulement à la conservation du sol et de son humidité, mais aussi à la suppression des mauvaises herbes. Les mauvaises herbes, en particulier les espèces pérennes dotées de structures étendues de reproduction souterraines, sont particulièrement préoccupantes dans les systèmes de zéro labour (Vogel, 1994). Il a été démontré antérieurement que les mauvaises herbes ne sont contrôlées que dans la mesure où le labour est régulier, ou si en AC la production de biomasse est suffisante (Naudin et *al.*, 2012), telle que le *Stylosanthes* comme culture de couverture

(Randrianjafizanaka et *al.*, 2018). Vanlauwe et al (2014) ont soutenu que dans les conditions de petites exploitations agricoles en Afrique subsaharienne, seules les applications appropriées des engrais selon les principes des pratiques en AC peuvent donner suffisamment de biomasse des cultures pour fournir les avantages suggérés. La présente étude montre que la biomasse des cultures peut être effectivement augmentée avec des applications additionnelles modérées d'engrais P_2O_5 (45 kg.ha^{-1}), mais ces augmentations ne sont significatives que pour le maïs associé à des légumineuses caractérisées par une production de niveau de biomasse faible à modérée, comme haricot-riz, niébé et *Mucuna*.

La décision d'appliquer des engrais phosphatés supplémentaires dans la 4^{ème} saison a été motivée par la faible performance du maïs et des légumineuses et la faible teneur en phosphore du sol pendant les précédentes saisons. Généralement, les sols drainants et érosifs, à faible teneur en matières organiques, sont sujets à la carence en P (Fairhurst et *al.*, 2002). Les sols du champ expérimental correspondent à ce profil et sont, en effet, extrêmement déficients en P, allant de $1,6$ à $3,0 \text{ mg.kg}^{-1}$ (P-Olsen) de sol. Le niveau critique de phosphore dans le sol pour le riz a été estimé à 12 mg.kg^{-1} (P-Bray) (Sahrawat et *al.*, 2001), soit environ 2 mg.kg^{-1} de P dans le sol. (Six et *al.*, 2013) ; et pour le maïs à $10,5 \text{ mg.kg}^{-1}$ (P-Olsen) (Ussiri et *al.*, 1998). Contrairement à l'azote qui peut provenir de l'air par la fixation de N_2 dans les légumineuses, le phosphore du sol ne peut être reconstitué par d'autres moyens que les engrais organiques ou inorganiques (Nziguheba et *al.*, 2016), dérivés des différences entre les apports de fumier et les rendements des cultures. Les apports saisonniers en P provenant du fumier de bovins (estimés à 15 kg.ha^{-1} de P dans le riz et la moitié de ceux des parcelles de maïs) ont été clairement insuffisants pour provoquer un impact notable, même lorsque les résidus de culture ont été ramenés au champ.

Les applications saisonnières du fumier de bovin, estimé à 102 kg.ha^{-1} de N au riz et la moitié pour le maïs, associées à l'élimination des résidus saisonniers (CONV) ont également entraîné des fluctuations des taux d'azote, sans diminution significative ni une diminution mesurée pour les quatre saisons. Le fumier de bovin, associé à la culture intercalaire de légumineuses et au RCP, a toutefois permis d'améliorer légèrement la teneur en azote au fil du temps. La biomasse de légumineuses contenait deux à trois fois la quantité d'azote observée dans la biomasse de riz ou de maïs, et une partie de celle-ci pourrait provenir de la fixation biologique de l'azote. Les teneurs en azote du sol peuvent être significativement améliorées lorsque les résidus de légumineuses fixatrices d'azote ne sont pas éliminés du champ (Vanolauwe et Giller, 2006).

III-5. Conclusion partielle

Une évaluation agronomique en quatre saisons a fourni des informations pertinentes sur les avantages et les inconvénients des pratiques de l'agriculture de conservation pour les petits systèmes de production de maïs-riz sur des sols pauvres, dégradables et infestés de *Striga asiatica*. Les avantages à court terme comprenaient un rendement modéré de riz et des augmentations de l'azote dans le sol, ainsi que des réductions de l'érosion de la surface du sol et des dommages causés par *S. asiatica*. Les rendements en riz ont été plus élevés après la culture intercalaire maïs-niébé-*Mucuna* et avec la variété de riz NERICA-4 résistante à *S. asiatica*. Les cultures associées avec *Stylosanthes* permettent de mieux lutter contre le ruissellement du sol et la mauvaise fertilité des sols. Les rendements faibles et variables des cultures de maïs et de légumineuses étaient des lacunes évidentes dans les pratiques d'AC testées ici. Celles-ci résultaient probablement des carences en P du sol, de la compétition interspécifique et de l'adaptation environnementale non optimale d'espèces ou de variétés. Des améliorations de ces pratiques peuvent donc être obtenues grâce à des applications ciblées d'engrais au phosphore et à la sélection des espèces et variétés de maïs et de légumineuses les mieux adaptées.

Chapitre 4 : Effet des paillages sur
l'émergence de *Striga asiatica* (L.)
Kuntze en champ inoculé

IV-1. Introduction

Striga asiatica L. (Kuntze) est une plante hémiparasite des graminées (Sallé et Aber, 1986). Il provoque des dommages importants sur la culture des céréales dans les régions tropicales (Doggett, 1984). Cette espèce se rencontre surtout dans les zones chaudes et arides (Sauerborn, 1991), en présence de leur plante-hôte (Ejeta et *al.* 1993 ; Joel et *al.* 1995). Pour mieux la combattre, il est nécessaire de connaître les conditions et les facteurs favorables au développement et à la croissance biologique de cette plante parasite.

La levée de dormance des graines de *S. asiatica* est favorisée par une légère humidité associée à des températures optimales comprises entre 25 et 32°C (Parker, 1983). Ensuite, sa germination est induite sous l'influence de quelques familles de phytohormones émises par les racines de ses plantes hôtes (Olivier, 1995 ; Yoneyama, 2010 ; Joel et *al.* 2013), telles que le riz, le maïs, le sorgho, etc. Ces phytohormones sont généralement représentées par les strigolactones (Yoneyama, 2010).

En général, les pratiques culturales au Moyen Ouest du Vakinankaratra favorisent l'infestation de ces plantes parasites et ainsi que leur propagation dans les milieux environnants (Andrianavo, 1998). Dans notre précédente étude (Randrianjafizanaka et *al.*, 2018), nous avons remarqué que, *S. asiatica* se développe plus sur les parcelles labourées que sur celles en agriculture de conservation (AC). L'AC étant une pratique culturale favorable pour les milieux marginaux (Wezel, 2013) basée sur le non travail du sol, la rotation culturale et les plantes de couverture. Les plantes de couverture sont réputées atténuer les aléas climatiques (Scopel, 2012) en diminuant les variations des amplitudes thermiques. Par conséquent, leurs couverts empêcheront la déshydratation rapide du sol qui pourrait ainsi défavoriser la levée des plantes adventices aussi bien de ces plantes parasites.

Les effets d'une couverture végétale peuvent probablement intervenir en cinq mécanismes sur *S. asiatica* :

- i) conservation de l'humidité du sol, facilitant la réhydratation des graines de *Striga* au début de la saison des pluies pendant leur phase de pré conditionnement, bien qu'un excès d'humidité puisse affecter les graines de *Striga spp.* par moisissure ;
- ii) réduction de la température du sol, *S. asiatica* étant une plante des zones chaudes, qui a besoin de température élevée pour sa germination ;
- iii) production, à travers les racines ou les résidus de la plantes, d'exsudats ayant des composés organiques à effets allélopathiques pour stimuler ou inhiber la germination des plantes adventices y compris *S. asiatica* ;

- iv) réduction du rayonnement lumineux sur le sol, privant par la suite les graines de *S. asiatica* de lumière, et inhibant leur germination ;
- v) constitution d'une barrière physique pour l'émergence de la jeune plantule de *S. asiatica*.

De ces faits, deux principales hypothèses sont testées :

- l'interception du rayonnement solaire par le recouvrement du sol à travers les paillis des plantes de couverture réduit la température au niveau du sol. En conséquence, il pourrait allonger la période de dormance des graines,
- la couverture végétale vivante ou morte contient des molécules induisant des effets allélopathiques, notamment dans le cas des espèces de la famille des légumineuses.

L'objectif principal de ce chapitre est alors de déterminer l'effet de couverts végétaux morts, en particulier des légumineuses (*Vigna unguiculata*, *Mucuna pruriensis*, *Vigna umbellata* et *Stylosanthes guianensis*), sur la levée de *S. asiatica* dans un champ contrôlé. Les effets du paillage tels le microclimat du sol, température à la surface et celui de l'allélopathie (exsudats) créés par les différents couverts de végétaux morts sont traités séparément. Ainsi, plus spécifiquement, cette étude cherche à :

- obtenir les effets des paillages sur le microclimat du sol ;
- comparer l'effet de la température du sol engendré par les paillages sur *S. asiatica* ;
- comparer la production de *S. asiatica* (capsules et biomasses) sous les différentes couvertures du sol.

IV-2. Matériels et méthodes

IV-2.1. Site d'étude

Durant la saison culturale novembre 2015 à mars 2016, une expérimentation a été conduite dans un champ expérimental à Ivory dans le Moyen Ouest de Madagascar. Le site est localisé à 19°33' au Sud et 46°24' à l'Est, à 900 m d'altitude.

Le milieu d'étude est caractérisé par un sol acide avec un pH de 5,3. C'est un sol limono-argileux d'après la classification des Oxisol (USDA). Le climat de moyenne altitude avec deux saisons bien distinctes : l'une chaude et pluvieuse d'octobre à avril et la seconde plutôt froide et sèche du mois de mai à septembre.

Pendant cette saison, la précipitation a varié de 0 à 155 mm et le cumul des pluies a été de 1288 mm, alors que la moyenne sur 11 années précédentes, fut de 1308 mm. Les données ont été relevées sur un pluviomètre situé à une distance de 100 m de l'expérimentation après

chaque période de pluie (de septembre à mai). La température moyenne de la zone a varié en moyenne autour de 24°C la nuit et de 32°C le jour. Ces mesures ont été obtenues avec une station automatique de type Cimetel placée à 1 000 m du site.

IV-2.2. Traitements expérimentaux

Le seul facteur mis en jeu dans les parcelles est la couverture végétale morte ou paillage du sol. Ce facteur correspond à la couverture du sol avec ses six modalités :

Les témoins :

- Sol nu
- Résidus inertes constitués de copeau de bois (*Pinus sp.*) traités

Les paillages testés :

- Résidus de *Mucuna pruriensis* (*Mucuna*)
- Résidus de *Vigna unguiculata* (niébé)
- Résidus de *Vigna umbellata* (haricot riz)
- Résidus de *Stylosanthes guianensis* (*Stylosanthes*)

Ces résidus de légumineuses sont issus du dispositif expérimental pour l'étude de la performance des cultures et de la gestion de *S. asiatica* à la fin de la saison culturale 2014-2015. Ensuite, ils sont amenés et stockés à Antsirabe afin de les préserver de toutes dégradations rapides causés par des différents facteurs abiotiques et biotiques.

Le témoin inerte, à base de copeaux de bois de pin (*Pinus sp.*) est obtenu d'une scierie localisée à Antsirabe. Afin d'éliminer les éventuels composés organiques pouvant agir sur la culture du riz et *S. asiatica*, un procédé de purification est nécessaire. Ainsi, 30 kg de ces copeaux sont bouillis dans 100 l d'eau pendant 30 minutes. Ensuite, ils passent au tamisage à l'aide d'une grande passoire, et rincés deux à trois fois à l'eau claire. L'opération doit être répétée jusqu'à la clarification de la solution, en moyenne trois fois.

La culture hôte est principalement le riz dont l'unique variété utilisée est B22. C'est une variété d'origine brésilienne et très sensible à *S. asiatica* dans le Moyen Ouest.

IV-2.3. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est randomisé en blocs aléatoires complets ou bloc de Fisher (RCBD). Le facteur étudié est la couverture végétale morte ou les paillages utilisés. Il est constitué de 72 parcelles, composé de ces six traitements et de 12 répétitions par traitement. Chaque parcelle de forme carrée (Figure 16), a une surface de 3, 24 m² (1,8 m × 1,8 m). Elle est composée de 9 lignes de riz distantes de 0,2 m entre elles, et chacune d'elle contient 9 poquets. Soit une densité de 25 poquets de riz par mètre au carré. Des allées de 0,5 m de

largeur séparaient les parcelles entre elles. Une placette d'observation de 1 m^2 ($1\text{ m} \times 1\text{ m}$) a été implantée au milieu de chaque parcelle. Elle est formée de 5 lignes de riz. Puis, les bordures laissées sur les quatre côtés des parcelles sont composées d'une paire de lignes.

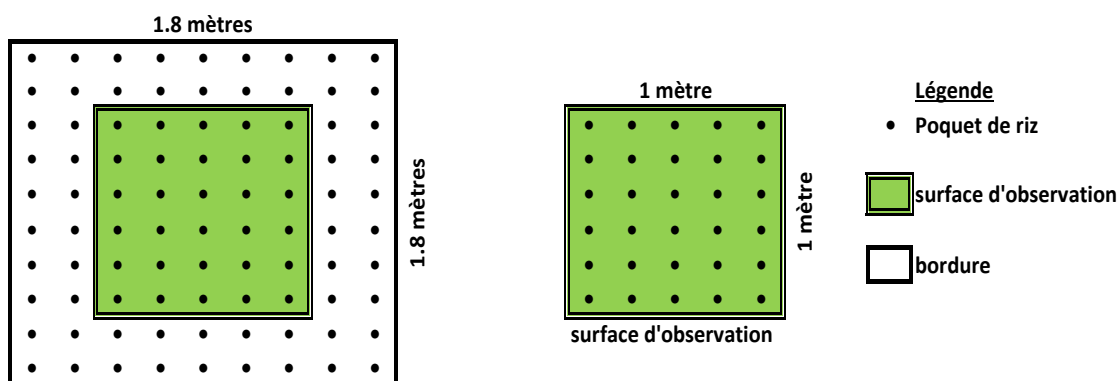


Figure 16 : Représentation schématique d'une parcelle expérimentale

IV-2.4. Préparation du terrain et gestions des cultures

Ce champ expérimental a été abandonné depuis 5 années en jachère avant la mise en place de cette culture expérimentale.

En mai 2015, un premier labour manuel effectué à l'aide d'un outil local nommé « *angady* » sur une profondeur moyenne allant de 15 à 20 cm dans l'ensemble du champ.

Le 23 novembre 2015, des travaux préliminaires accomplis sont le nettoyage, le démottage et la délimitation des parcelles ainsi que de leurs allées.

Le 24 novembre 2016, avant la culture du riz, $0,35\text{ g.m}^{-2}$ de graines de *S. asiatica* sont épandues au sol sur des parcelles prêtes pour le semis. Cette dose correspond à l'infestation de deux pieds de *S. asiatica* par m^2 . L'homogénéité de la répartition de ces semences dans l'espace est assurée par le mélange de 175 g de sable pour 1,14 g de graines de *S. asiatica* dans chaque parcelle. Enfin, un remuage léger de la couche supérieure du sol, recouvre l'ensemble sol-graines.

Le 25 novembre 2015, le riz est semé à la dose de 5 graines par poquet sur 2-3 cm de profondeur. L'écartement des poquets est de $20 \times 20\text{ cm}$ sur ligne et interligne.

Après le semis, l'unique fertilisation apportée est l'engrais minéral superphosphate triple à une dose de 50 kg ha^{-1} . Aucune fertilisation organique n'est apportée à cette expérimentation. Ensuite, selon la disposition des traitements dans l'expérimentation, les pailles des légumineuses (*S. guianensis*, *V. umbellata*, *V. unguiculata* et *M. pruriensis*) et les paillis inertes de copeaux de bois (*Pinus*, *sp.*) sont répandues de manière à couvrir totalement le sol des placettes d'observation (Photo 6). En effet, les quantités totales des chaque espèce

de paillis sont insuffisantes pour couvrir la surface totale de toutes les parcelles. La quantité moyenne de résidus par espèce de ces plantes apportée est de 1 kg, soit 10 t.ha⁻¹. Au cours de cette saison culturale, un rajout régulier de 100 g de résidus compense la dégradation de paillis suite aux facteurs climatiques (pluies, chaleur) et biologiques (microorganismes du sol). Ce procédé est effectué à toutes les parcelles tous les 15 jours à partir du 45^{ème} JAS (45, 60, 75, 90 et 105 JAS).

Puis, après le recouvrement du sol, huit thermomètres enregistreurs automatiques sont implantés au centre de quelques parcelles d'observation du dispositif expérimental. Deux d'entre eux placés à la surface du sol (0 cm), sur deux parcelles échantillons, représentent les traitements : sans couvert (sol nu) et avec couvert (*Stylosanthes*) ; et les six restants placés à 2,5 cm de profondeur du sol, dans six parcelles échantillons également, représentent les traitements : sol nu, inertes, *M. pruriensis*, *V. unguiculata*, *V. umbellata* et *S. guianensis*).

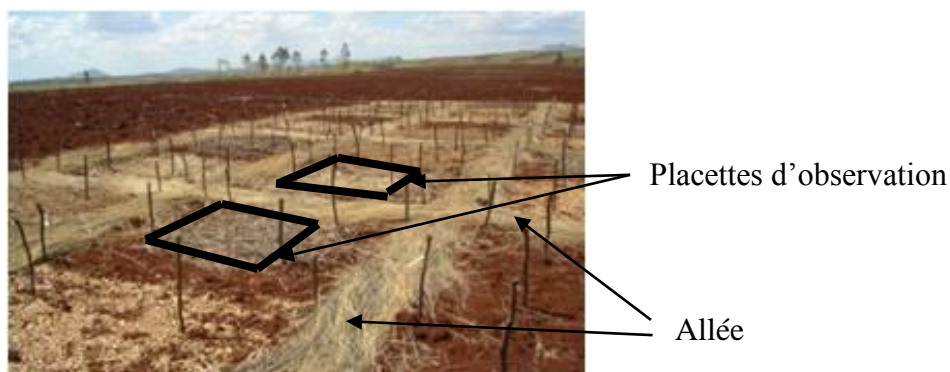


Photo 6 : Vue globale des parcelles après semis du riz

IV-2.5. Mesures et observations

IV-2.5.1. Facteurs abiotiques ou microclimats

Les facteurs abiotiques sont représentés par la température et l'humidité du milieu sol, conditions principales pour la levée de dormance des graines de *S. asiatica*. Par conséquent, les mesures de ces facteurs sous les couvertures du sol permettraient de vérifier l'existence ou non d'une perturbation des conditions de croissance et de développement de *S. asiatica*.

Au moment de semis à la récolte, les mesures régulières de la température du sol sont enregistrées automatiquement sur les huit parcelles représentatives des traitements. Les appareils de mesure sont des thermomètres du modèle Tinytag (Gemini data logger). Chacun d'eux possède une sonde placée horizontalement à la surface ou à l'intérieur du sol, assurant la prise de la température. La sonde transcrit les variations de l'amplitude thermique (les minima, les moyennes et les maxima) toutes les 30 minutes, depuis le premier jour de semis jusqu'à la récolte. Par la suite, huit séries de mesures durant 121 jours sont obtenues.

Dans cette expérimentation, le bilan de l'humidité hebdomadaire du sol, avant la levée des jeunes plants de *S. asiatica* considéré est de décembre 2015 à janvier 2016 due à la panne de l'appareil en février. Ces données sont suffisantes pour l'évaluation de la période propice à la germination des graines de *S. asiatica*. Les mesures régulières relevées dans l'ensemble des parcelles, sont réalisées deux fois par semaine, tous les deux ou trois jours, à l'aide d'un humidimètre. C'est un appareil du modèle TDR Spectrum technologies, Inc. Items # 6440FS, field scout TDR 100 System. A chaque observation, deux mesures par parcelle sont notées néanmoins, seule leur moyenne est prise en compte. Pour l'ensemble des traitements, 48 valeurs sont ainsi obtenues (moyenne des répétitions) durant ces huit semaines de mesures.

IV-2.5.2. Développement de *Striga asiatica*

En ce qui concerne *S. asiatica*, les quatre types de notations réalisées sont i) l'évaluation de l'homogénéité de la répartition spatiale des graines, ii) les premières dates séparant les étapes du cycle biologique de *S. asiatica*, iii) la densité de pieds levés de *S. asiatica* dans les parcelles, et iv) la production de *S. asiatica* en capsules et en biomasses sèches à la fin de son cycle.

Pour vérifier l'homogénéité de la répartition des graines de *S. asiatica* dans le sol et de leur émergence antérieure, des prélèvements du sol sont juste faits après la mise en place de la culture (à 7 JAS) dans toutes les parcelles. Ces sols sont prélevés sur trois profondeurs (0-5 cm, 5-10 cm et 10-20 cm) à l'aide d'un cylindre de 5 cm de diamètre. Ils sont pris sur deux endroits opposés de chaque parcelle, ensuite ils sont rassemblés et homogénéisés à chaque niveau. Puis un échantillon de 200 g de ce mélange est retenu puis conservé et numéroté dans un emballage plastique. L'extraction des graines de *S. asiatica* dans ces échantillons de sol suit la méthode de Hartman et Tanimonure (1991). Le principe est de faire flotter les graines de *Striga* du sol à travers une solution de saccharose de densité de 1,20. Les échantillons de sol sont alors tamisés et rincés à l'eau courante sur quatre tamis successifs de 250, 200, 150 et 125 microns, et seule ceux des trois dernières mailles sont retenues. Ils sont ensuite versés séparément dans des béciers à l'aide d'une pissette contenant de la solution de saccharose (la densité 1,20 est obtenue par dissolution de 855 g de sucre dans 1 l d'eau). Ensuite, chaque solution sol-saccharose est passée 5 minutes à l'agitateur magnétique, décantée pendant deux heures, puis filtrée à l'entonnoir sur des papiers filtres. Finalement, les filtrats obtenus sont tous observés à la loupe binoculaire (grossissement $\times 5$) pour le comptage des graines de *S. asiatica*.

Le relevé de la première date séparant les étapes du cycle biologique de *Striga asiatica* consiste à noter la date de la première apparition de nouvelle étape physiologique de *S.*

asiatica rencontré dans chaque parcelle. A partir du 40^{ième} JAS jusqu'à l'apparition des premières plantes sénescentes dans chaque traitement, une observation régulière des *S. asiatica* est fait tous les deux jours. Quatre dates sont distinguées : l'émergence, la floraison, la fructification et la sénescence.

Les comptages de la densité des pieds de *S. asiatica* sont élaborés de manière à valoriser les différents comportements éventuels de cette plante dans son milieu. La population de *S. asiatica* est comptée à quatre dates d'observation (70, 85, 100 et 115 JAS). Dans les parcelles, *S. asiatica* est catégorisé en fonction de son stade de développement (jeunes pousses, en fleur, en fruit, en sénescence et mort), et de la ramification de sa tige (tige unique ou tige multiples).

A la fin de son cycle, chaque pied de *S. asiatica* donne deux produits : des capsules contenant les graines, et des biomasses aériennes (matières sèches). Après la floraison, le nombre des plantes en capsule est ainsi relevé, et après la récolte du riz, les biomasses fraîches de *S. asiatica* sont toutes coupées à la base, pesées vertes et séchées à l'étuve (60°C pendant 48 h) pour l'estimation du taux de la matière sèche.

IV-2.6. Analyses des données

Les données des mesures de la température et de l'humidité sont ramenées à leurs moyennes hebdomadaires. Elles ont été traitées par l'analyse de la variance avec ANOVA. Pour i) les dates d'émergence, de floraison, de fructification et de sénescence de *S. asiatica*, le nombre de jours après semis (JAS) a été utilisé. Il a également été traité avec l'analyse de variance ou ANOVA.

Le relevé de ii) la densité de *S. asiatica* en émergence dans les parcelles est évalué sur quatre périodes, (70, 85, 100 et 115 JAS). L'analyse de ces données est subdivisée en deux parties : la densité maximale et la densité de *S. asiatica* en fonction des différentes périodes d'observation. Pour ces derniers, elle est considérée sur le plan qualitatif (les étapes physiologiques de la plante et sa morphologie), tandis que la densité maximale permet d'estimer la quantité de plants de *S. asiatica* définitive sur les parcelles. L'analyse de la variance est également faite sur ces observations.

Comme les variables n'ont pas suivi les lois de la distribution normale, ils ont été ainsi soumis à des transformations logarithmiques ($\text{Log } 10$) suivant $\text{LOG } X + c$, où X est la valeur réelle, et c une constante égale à 1 pour répondre aux hypothèses de l'analyse de la variance. Les moyennes présentées sont des valeurs retro-transformées. Les données soumises à l'ANOVA, ont utilisé le modèle mixte, et les moyennes ont été comparées avec le test LSD de

Fisher ($P < 0,05$). Ces analyses de données ont été réalisées avec la version XLSTAT 2014.5.03 (MS Excel, 2014).

IV-3 Résultats

IV-3.1. Facteurs abiotiques ou microclimats:

IV-3.1.1. Pluviométrie du site d'étude

Durant la campagne 2015-2016, la pluviométrie décadaire a varié de 0 à 155 mm en fonction des périodes. Les plus fortes précipitations se sont situées à partir de début décembre jusqu'à fin mars (Figure 14). Puis, elle s'est arrêtée en avril. Généralement les pluies, au cours de cette expérimentation, ont été supérieures à la moyenne des pluies annoncées depuis 2006. Cependant une période de sècheresse continue, par rapport à cette moyenne, a été constatée en novembre (décades 2 et 3).

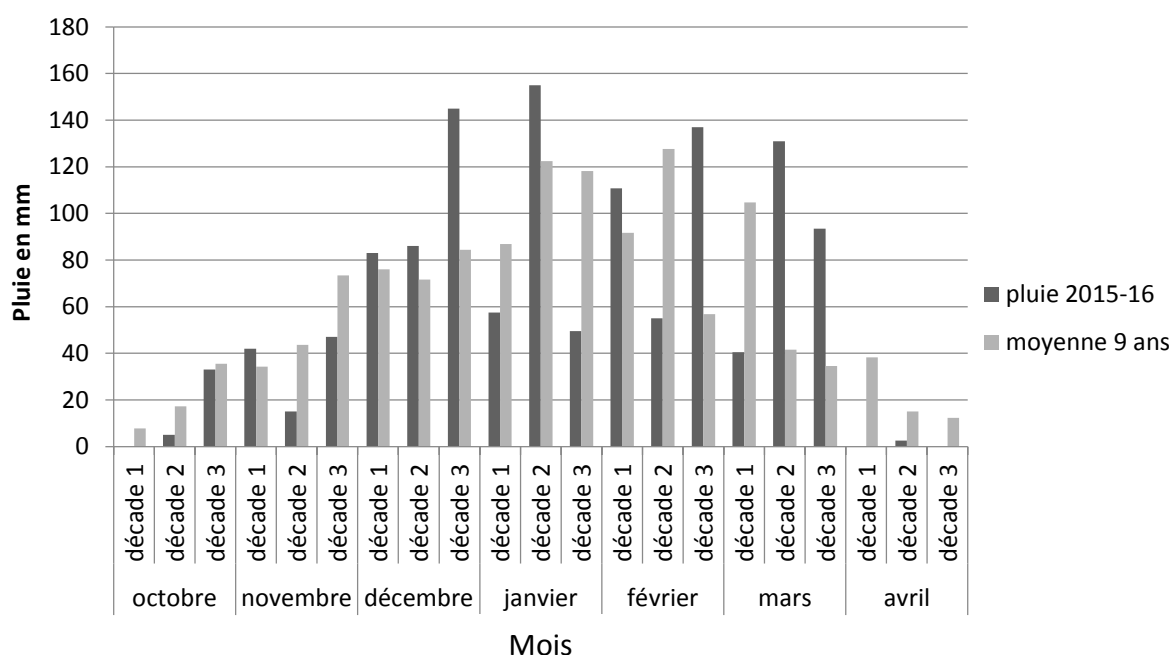


Figure 17 : Pluviométrie décadaire du site d'étude durant la saison culturale 2015-2016.

IV-3.1.2. Humidité du sol sous les paillages

Les résultats de mesures sur l'humidité du sol observée ont montré une variation relative en fonction de la pluviométrie du milieu (Tableau 12). Au cours de la saison expérimentale, des effets significatifs des traitements paillages du sol ont été constatés sur

Tableau 12 : Taux d'humidité du sol (en %) durant huit semaines de décembre à janvier avec les six traitements (sol nu, inerte, *Mucuna pruriensis*, *Vigna unguiculata*, *Vigna umbellata* et *Stylosanthes guianensis*).

Les différents paillages du sol															
		Sol nu		Résidus inertes		<i>Mucuna pruriensis</i>		<i>Vigna unguiculata</i>		<i>Vigna umbellata</i>		<i>Stylosanthes guianensis</i>		Moyennes	
Décembre	s50	12,7		17,9		12,4		11,9		18,8		12,8		14,4	D
	s51	16,4		18,3		16,2		16,5		17,4		16,8		16,9	C
	s52	22,1		24,6		23,4		22,9		24,4		23,3		23,4	B
	s53	28,2		28,2		28,5		27,3		27,9		28,0		28,0	A
Janvier	s1	15,0		17,1		14,7		14,5		14,1		13,5		14,8	D
	s2	21,3		23,9		22,0		22,9		23,2		23,0		22,7	B
	s3	23,0		23,0		22,8		23,6		23,6		23,7		23,3	B
	s4	18,1		15,5		12,4		12,4		13,6		13,0		14,2	D
Moyennes		19,6	XY ¹	21,1	X	19,0	Y	19,0	Y	20,4	XY	19,3	Y		
Source		ddl		F		P		SED							
P		5		2,62		0,0237		0,733							
PM		7		77,42		< 0,0001		0,847							
P x PM		35		0,86		0,6987									

¹Les valeurs suivies des lettres différentes sur les lignes et colonnes sont significativement différentes à $P < 0,05$ selon le test de Fischer.

P : paillage du sol ; PM : point de mesure de la température ;

s : semaines de l'année (s1 ; s2 ; s3 ; s4; s50; s51; s52; s53)

l'humidité du sol. En comparant la teneur en eau moyenne du sol pour les différentes dates sous les différentes couvertures (Tableau 12), le témoin inerte a retenu plus d'eau (21,1%) que les autres traitements avec couverture. Le sol sous traitement « Inerte » est significativement plus humide que les sols sous traitements « *M. pruriensis* » « *V. unguiculata* » et « *S. guianensis* ». Cependant, aucune différence n'a été constatée entre les traitements « inerte » et « sol nu » ou « *V. umbellata* ».

IV-3.1.3. Température du sol

IV-3.1.3.1. En fonction des points de mesure : interne et externe

La figure 18 suivante montre la synthèse des moyennes de la variation des amplitudes thermiques hebdomadaires durant l'expérimentation, en sol nu (a) et en sol couvert (b), à la surface et à 2,5 cm de profondeur. L'amplitude thermique est la différence entre la température la plus élevée et la température la plus basse. Au niveau des deux points de mesure, les températures maximales ont présenté des écarts plus importants de 20°C en moyenne. En sol nu (a), elles ont été plus élevées dépassant généralement les 50°C sur les trois quart des périodes d'observation. Elles pouvaient aller jusqu'à 60°C à l'intérieur du sol et atteindre des extrêmes de plus de 70°C à la surface. Cependant pour le sol couvert (b), ces maxima se sont situés généralement entre 30 à 40°C dans les deux points de mesure. Les températures moyennes étaient autour de 25 à 28°C pour les sols couverts, et ont dépassées 30°C uniquement en sols nus. Les minima ont oscillé entre 20 à 22°C pour les sols couverts, et ont été plus basses pour les sols nus autour de 18 à 20°C.

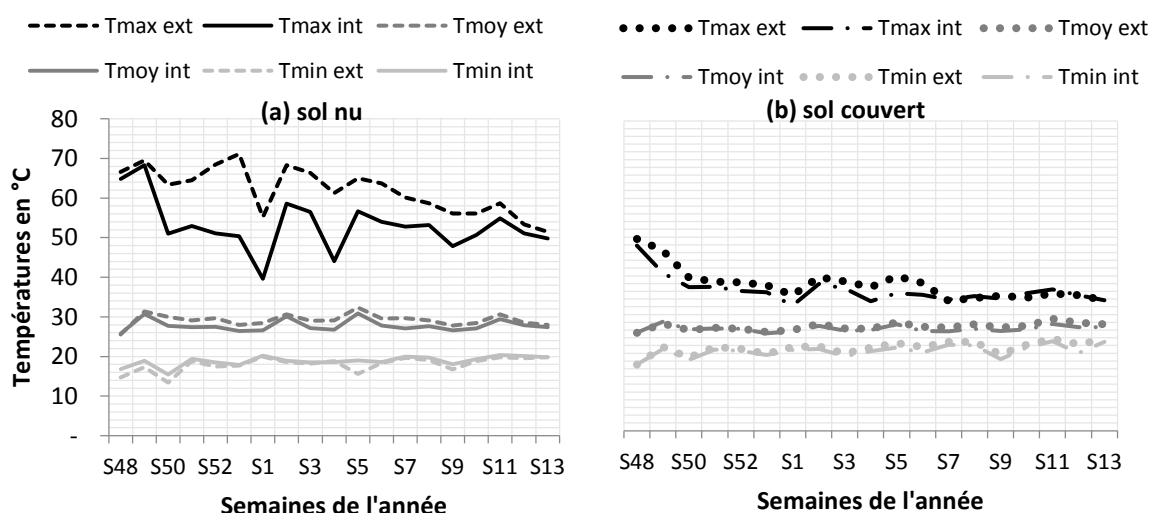


Figure 18 : Variation de l'amplitude thermique (maximum, moyenne et minimum) du sol pendant les 19 semaines de la saison expérimentale en fonction de la couverture du sol : sol nu (a) et sol couvert avec *Stylosanthes guianensis* (b) sur deux points de mesure : externe (0 cm) et interne (-2,5 cm).

Le test de Fisher a montré des différences significatives à $P < 0,05$ de tous les paramètres testés et de leurs interactions (Tableau 13). Les différences constatées entre la variation des amplitudes thermiques des trois niveaux de température (maximale, moyenne et minimale) ont augmenté progressivement du minima au maxima.

Tableau 13 : Analyse de la variance et moyennes des températures du sol en fonction de l'amplitude thermique (AT) dans la journée, de la couverture du sol (C), de leurs points de mesures (PM) et de leurs interactions, pendant les 19 semaines de la saison expérimentale (2015-2016).

Source		ddl		F		P> F		
Amplitude thermique (AT)		2		1680,3		< 0,0001		
Couverture du sol (C)		1		563,2		< 0,0001		
Point de mesure (PM)		1		27,0		< 0,0001		
Semaines de l'année (S)		18		5,6		0,0003		
AT x C		2		310,4		< 0,0001		
AT x PM		2		16,4		< 0,0001		
C x PM		1		7,5		0,0069		
AT x C x PM		2		11,1		< 0,0001		
		Sol nu		Sol couvert		Moyennes		
AT xC	T max	57,5	a ¹	37,1	b			
	T moyen	28,5	c	26,6	d			
	T min	18,4	f	21,0	e			
AT x PM		Externe (0 cm)		Interne (-2,5 cm)				
	T max	49,9	a	44,7	b	47,3	A	
	T moyen	28,0	c	27,1	c	27,6	B	
	T min	19,7	d	19,7	d	19,7	C	
C x PM	sol nu	36,4	a	33,2	b	34,8	A	
	sol couvert	28,7	c	27,7	c	28,2	B	
AT x C x PM	T max	sol nu	62,0	a	53,1	b	57,5	A
		sol couvert	37,9	c	36,3	c	37,1	B
	T moyen	sol nu	29,2	d	27,8	de	28,5	C
		sol couvert	26,9	e	26,3	e	26,6	D
	T min	sol nu	18,0	h	18,9	gh	18,4	F
		sol couvert	21,4	f	20,6	fg	21,0	E
Moyennes		32,6	X	30,5	Y			
sed (AT)		0,4901						
sed (C)		0,4002						
sed (PM)		0,4002						
sed (AT x C)		0,6931						
sed (AT x PM)		0,6931						
sed (C x PM)		0,5659						
sed (ATx C x PM)		0,9802						

¹Les valeurs sur chaque ligne suivies de lettres sont significativement différentes à $P < 0,05$, selon le test de Fischer.

AT : minimale, moyenne et maximale ; C : sol nu et sol couvert avec *S. guyanensis* ; PM : externe ou interne. ddl : degré de liberté ; F : test de Fisher, P : probabilité ; sed : standard error of difference.

Entre les deux caractéristiques de sol et sur les deux horizons observés, les résultats obtenus pour les sols nus ont été supérieurs de 6,6°C en moyenne par rapport aux sols couverts. Ils ont été significativement plus chauds en surface qu'à l'intérieur du sol. En profondeur, leurs températures maximales ont diminué d'environ 9°C. Cependant, les sols couverts n'ont présenté aucune variation de chaleur sur les deux points de mesure. Généralement leurs amplitudes thermiques de la journée ont été inchangées dans les deux profils, néanmoins, leurs minimas ont monté de 3°C en surface et de seulement 1°C en profondeur comparés à ceux des sols nus (Tableau 13).

IV-3.1.3.2. En fonction de l'espèce de la plante de couverture du sol

A partir de la 50^{ième} semaine de l'année, les moyennes hebdomadaires de l'amplitude thermique sur certaines périodes ont donné une homogénéité de la température maximale du sol chez les sols couverts de paillis. Leurs oscillations ont été comprises entre 32 à 42°C. Alors qu'en sol nu des pics extrêmes ont atteint plus de 70°C dans la même période (Figures 19 et 20). Les températures moyennes du sol ont été très variables pour chacun des traitements comparés. Seuls les sols sans couverture ont eu des valeurs au dessus des 30°C. Toutes les températures nocturnes n'ont généralement pas dépassé les 25°C (Figures 19 et 20).

Les tests statistiques ont défini des effets hautement significatifs pour tous les paramètres comparés (Tableau 14). Le tableau 14 suivant montre au niveau des paillages du sol, une différence moyenne de 5°C entre les sols nus et les sols couverts (l'ensemble de paillages). En comparant les couvertures du sol, les plus basses températures ont été observées sous les paillis de *Vigna umbellata* et ceux de *Stylosanthes guianensis*.

Pour le cas des variations des amplitudes thermiques, les températures se sont également élevées du minima au maxima. La moyenne de l'ensemble des températures maximales a été presque non seulement le double de celle des températures minimales, mais elle a dépassé aussi largement les 30°C (Tableau 14).

Ensuite, l'interaction des paillages avec la variation des amplitudes thermiques ont donné des maxima plus élevés en sol nu (>50°C) que les sols couverts (<40°C). Entre les paillis, seuls les sols avec couverture de niébé, ont eu une température supérieure de 3°C par rapport aux autres couvertures. En absence du soleil, les minima chez les sols nus ont été de 2°C moins froids par rapport à l'ensemble des sols couverts. Enfin, que le sol soit couvert ou nu, les températures moyennes y ont été similaires (Tableau 14).

Tableau 14 : Variations de l'amplitude thermique du sol dans la journée à 2,5 cm de profondeur en fonction des différents paillages du sol et de leurs interactions, pendant les 19 semaines de la saison expérimentale.

Source	ddl	F	P> F
Amplitude thermique(AT)	2	11776,8	<0,0001
Paillages (P)	5	12,3	<0,0001
Semaines (S)	18	108,9	<0,0001
AT x P	2	32,6	<0,0001

	T maximales	T moyennes	T minimales	Moyennes
Sol nu	53,1 a ¹	27,8 d	18,9 f	33,2 A
Inerte	37,0 c	26,7 d	21,1 e	28,3 BC
<i>Mucuna pruriensis</i>	39,4 b	27,4 d	21,3 e	29,4 B
<i>Vigna unguiculata</i>	36,8 c	26,7 d	21,4 e	28,3 BC
<i>Vigna umbellata</i>	36,2 c	26,5 d	20,6 ef	27,8 C
<i>Stylosanthes guianensis</i>	36,3 c	26,3 d	20,6 ef	27,7 C
Moyennes	39,8 A	26,9 B	20,6 C	

sed (AT)	1,0968
sed (P)	0,5686
sed (ATxP)	0,9849

¹Les valeurs suivies de lettres sont significativement différentes à $P < 0,05$, selon le test de Fischer.

Amplitude thermique : maxima, moyenne et minima ; saison expérimentale : 48^{ème} semaine de l'année 2015 au 13^{ème} semaine de l'année 2016 ; paillages du sol : sol nu, inerte, *Mucuna*, niébé, haricot-riz et *Stylosanthes*.

ddl : degré de liberté ; F : test de Fisher, P : probabilité ; sed : standard error of difference

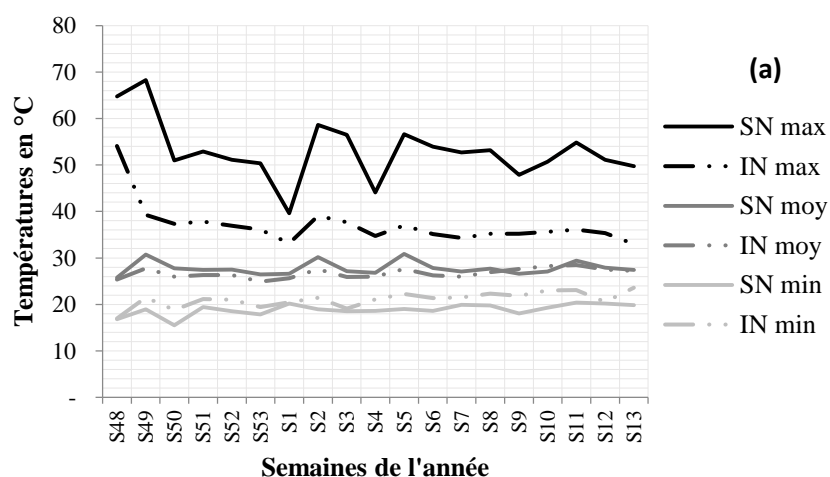


Figure 19 : Variation de l'amplitude thermique du sol pendant les 19 semaines de la saison expérimentale (S48-S13), à 2,5 cm de profondeur sous des paillages inertes comparée au témoin sol nu.

Amplitude thermique : maxima, moyenne et minima ; saison expérimentale : 48^{ème} semaine de l'année 2015 au 13^{ème} semaine de l'année 2016 ; IN : inerte; SN : sol nu.

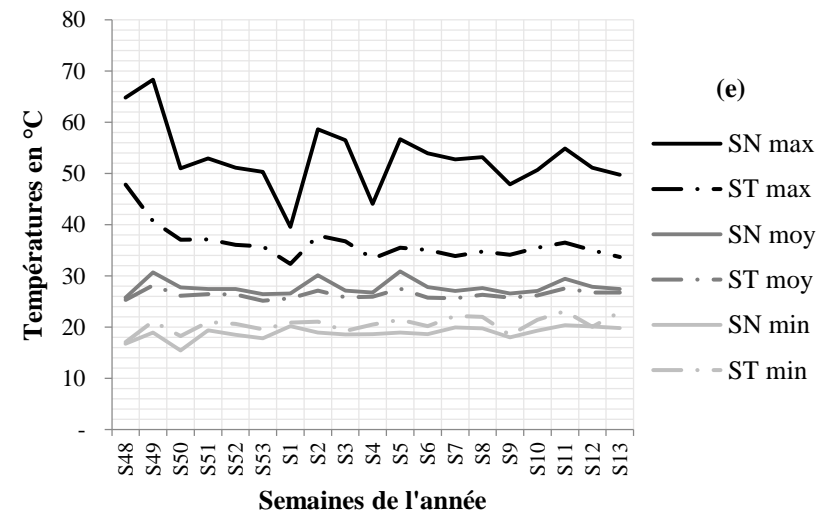
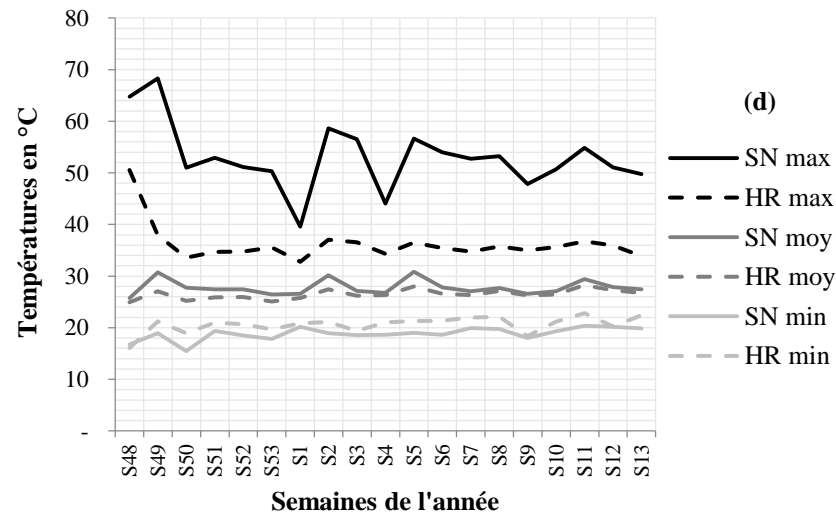
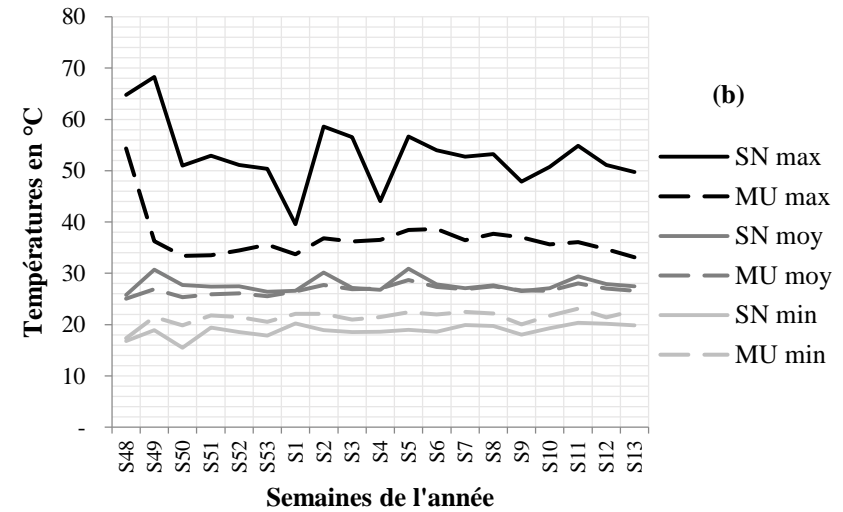
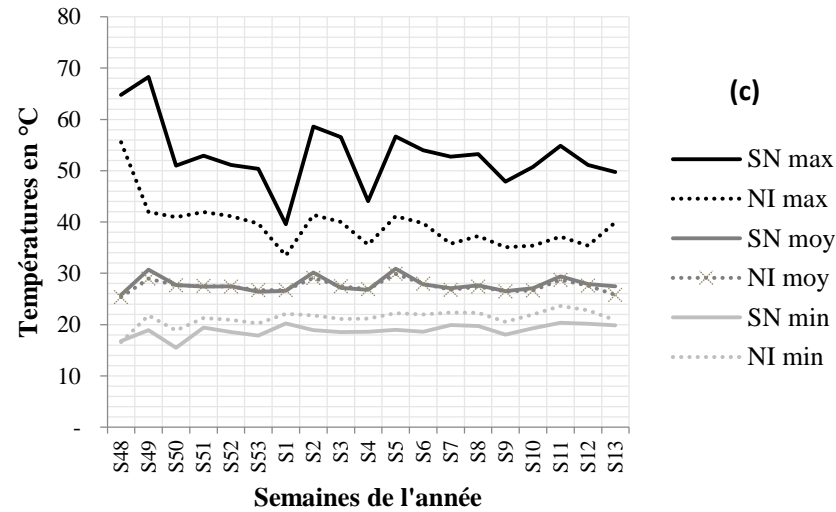


Figure 20 : Variation de l'amplitude thermique du sol pendant les 19 semaines de la saison expérimentale (S48-S13), à 2,5 cm de profondeur sous différents types de paillages : (b) *M. pruriensis*, (c) *V. unguiculata*, (d) *V. umbellata*, et (e) *S. guianensis* ; comparée au témoin sol nu.
MU : *Mucuna* ; NI : niébé, HR : haricot-riz, ST : *Stylosanthes* et SN : sol nu.

IV-3.2. Infestation de *Striga asiatica*

IV-3.2.1. Estimation de la densité des graines de *Striga asiatica* avant la mise en place des cultures

Au moment de l'installation de la culture, au même niveau d'infestation de graines de *S. asiatica*, aucune influence des traitements ne s'était révélée sur la densité des graines de *S. asiatica*. Cependant, une différence significative a été constatée au niveau des profils de prélèvement du sol (Tableau 15). Les semences de *S. asiatica* ont été plus concentrées dans les premiers horizons (0-5 cm). Ces dernières ont été quantitativement estimées de 1 300 fois plus élevées en surface qu'aux profondeurs 5-10 et 10-20 cm justifiant l'application superficielle des graines légèrement enfouies lors de l'ensemencement de *S. asiatica* à 0,35 g.m⁻², soit environ 500 000 graines.m⁻² (Tableau 15).

Tableau 15 : Densité de graines de *Striga asiatica* par m² sur les trois niveaux de profondeur (0-5, 5-10 et 10-20 cm) en fonction des paillages du sol et de leur interaction.

Source	ddl	F	P> F
Paillage (P)	5	1,31	0,2916
Bloc	5	0,60	0,6980
Profondeur (Pr)	2	192,33	< 0,0001
P × Pr	10	0,87	0,5628
	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm
Moyennes	4518,38 A ¹	3,43 B	3,50 B
sed (P)	0,823		

¹Les valeurs suivies de lettres sont significativement différentes à $P < 0,05$, selon le test de Fischer.

Paillages du sol : sol nu, inerte, *M. pruriensis*, *V. unguiculata*, *V. umbellata* et *S. guianensis*
ddl : degré de liberté ; F : test de Fisher, P : probabilité ; sed : standard error of difference

IV-3.2.2. Premières dates séparant les différentes étapes de développement du cycle de *Striga asiatica*

Des effets significatifs bien distincts entre les espèces des paillages ont été remarqués au niveau des premières périodes de la levée et celle de la floraison de *S. asiatica* (Tableau 16).

Tableau 16 : ANOVA sur les premières dates des différents stades de développement de *Striga asiatica* des différents paillages du sol.

ANOVA	Source	ddl	Levée		Floraison		Sénescence		Mort	
			F	P> F	F	P> F	F	P> F	F	P> F
	Paillages	5	8,30	<0,0001	3,83	0,01	1,60	0,20	1,18	0,35
	Bloc	5	1,76	0,16	2,42	0,06	0,90	0,50	0,78	0,57
	Sed(P)		1,72		2,37					

Paillages du sol : sol nu, inerte, *Mucuna*, niébé, haricot-riz et *Stylosanthes*

ddl : degré de liberté ; F : test de Fisher, P : probabilité ; sed : standard error of difference

La figure 21 montre les dates en jours après semis des premières apparitions des jeunes pousses de *S. asiatica* ainsi que leurs fleurs sous les différents paillages utilisés. Les premières levées de *S. asiatica* ont débuté à partir de 40 JAS, puis elles se sont étalées sur 15 jours, variables, selon le type de paillis apportés. Entre les sols couverts de résidus de légumineuses, les premières apparitions des jeunes plants de *S. asiatica* (44 JAS) ont été constatées dans les paillages de *V. umbellata* et de *S. guianensis*. Alors que des levées plus tardives ont été obtenues avec ceux de mucuna présentant un écart de 10 jours. Tandis qu’avec le témoin inerte et le paillis de niébé, leurs premières émergences de *S. asiatica* sont d’environ 4 jours après ceux de *V. umbellata* et de *S. guianensis*.

Les premières fleurs ont commencé vers 60 JAS dans les parcelles. Elles ont aussi varié en fonction de la nature des couvertures du sol. En moyenne, pour tous les types de paillage, ces premières fleurs sont apparues autour de la même période (72 JAS), excepté ceux de *M. pruriensis* ayant eu un retard significatif de 7 jours par rapport à celles de *V. umbellata* et de *S. guianensis*.

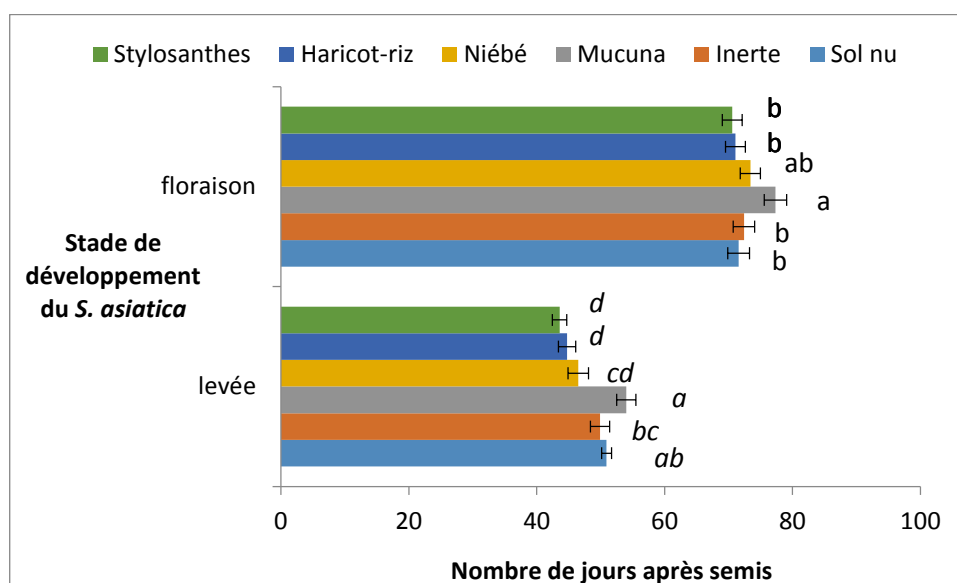


Figure 21 : Effet de la couverture du sol sur les premières dates de la levée et de la floraison de *Striga asiatica* en phase aérienne en fonction de la nature des paillages du sol
Paillages du sol : sol nu, inerte, *Mucuna*, niébé, haricot-riz et *Stylosanthes*

IV-3.2.3. Densité de pieds de *Striga asiatica*

IV-3.2.3.1. Densité maximale de pieds de *Striga asiatica*

Les paillages du sol ont montré un effet significatif sur la répartition maximale de *S. asiatica* (Tableau 17). Les paillages de légumineuses ont eu des densités plus élevées en *S. asiatica* par rapport à ceux relevés sur les témoins en paillis inertes et en sol nu. Parmi les légumineuses observées, seul le paillis de *Stylosanthes* a eu le plus grand nombre de pieds de

S. asiatica sur leurs parcelles par rapport au témoin inerte avec une différence moyenne de plus de 100 pieds.m², tandis que le nombre de *S. asiatica* trouvés sur *Mucuna* a été le seul plus faible que celui sur *Stylosanthes* avec le même écart moyen du témoin (Tableau 17). Aucune différence significative avec le témoin n'a été relevée sur l'infestation rencontrée sous les couvertures de *V. unguiculata* et de *V. umbellata*.

Tableau 17 : Nombre maximal de pieds *Striga asiatica* au cours de la saison culturale après une analyse de la variance et une comparaison des moyennes en fonction des traitements comparés.

	Source	ddl	F	P> F
ANOVA	paillages	5	3,70	0,01
	bloc	5	1,89	0,13
Comparaison des moyennes	Paillages	NSmax m ⁻²		ETM
	Sol nu	307,7	c ¹	±15,1
	Inerte	319,6	bc	± 21,5
	<i>Mucuna pruriensis</i>	312,3	bc	± 46,6
	<i>Vigna. unguiculata</i>	407,4	ab	± 22,5
	<i>Vigna umbellata</i>	398,2	abc	± 53,4
	<i>Stylosanthes. guianensis</i>	435,7	a	± 36,8
	SED (P)	0,059		

¹Les valeurs suivies de lettres sont significativement différentes à $P < 0,05$, selon le test de Fisher.

Saison culturale : 2015-2016 ; Traitements comparés : sol nu, inerte, *M. pruriensis*, *V. unguiculata*, *V. umbellata* et *S. guianensis*.

ddl : degré de liberté ; F : test de Fisher ; P : probabilité ; ETM : Ecartype de la moyenne.

IV-3.2.3.3. Densité maximale de *Striga asiatica* en fonction de sa morphologie (tige unique ou tige multiple)

La ramification des plants de *S. asiatica* (tige unique et tige multiple) et le paillage sur lesquels ils se sont développés ont été significativement différents par le test de Fisher à $P < 0.05$. Sur une densité maximale des plantes émergées, 66,4 % ont été des plantes à tige unique ou filiforme, et 35,03 % à tige multiple ou branchues. Notons que ces caractéristiques de *S. asiatica* ne sont pas liées aux paillages.

IV-3.2.3.3. Nombre total de pieds de *Striga asiatica* à différentes dates d'observation

Au niveau des deux premiers comptages (70 et 85 JAS), les analyses de la variance ont donné des différences significatives des paillages du sol sur le nombre total de *S. asiatica*. A partir du 100^{ème} JAS, quelle que soit l'espèce de la couverture du sol, elle n'a plus eu d'effet sur la population de *S. asiatica* dans les parcelles (Tableau 18).

Tableau 18 : Nombre total de *Striga asiatica* à différentes dates d'observation

			70 JAS (pieds.m ²)		85 JAS (pieds.m ²)		100 JAS (pieds.m ²)		115 JAS (pieds.m ²)	
ANOVA	Source	ddl	F	P	F	P	F	P	F	P
	Paillages	5	15,3	< 0,0001	4,4	0,01	2,5	0,06	1,1	0,41
	Bloc	5	0,9	0,51	1,8	0,15	5,9	0,001	0,66	0,66
Moyennes	Sol nu		36,6	c ¹	195,8	b	196,8		293,6	
	Inerte		59,0	b	240,0	ab	224,1		295,3	
	<i>Mucuna pruriensis</i>		34,6	c	188,2	b	209,5		290,4	
	<i>Vigna unguiculata</i>		54,1	bc	206,5	ab	306,6		385,1	
	<i>Vigna umbellata</i>		82,2	ab	285,9	a	323,8		349,5	
	<i>Stylosanthes guianensis</i>		115,5	a	278,6	a	261,6		336,5	
sed (P)			0,098		0,073					

*Les valeurs suivies de lettres sont significativement différentes à $P < 0,05$, selon le test de Fischer.

Dates d'observation : 70, 85, 100 et 115 JAS ; Traitements comparés : sol nu, inerte, *M. pruriensis*, *V. unguiculata*, *V. umbellata* et *S. guianensis*.

ddl : degré de liberté ; F : test de Fisher P : probabilité JAS : jours après semis

Sur deux premières dates d'observations, des densités totales en *S. asiatica* sur paillages de *Stylosanthes* et de haricot-riz ont été supérieures aux autres traitements. Cependant, celles de *Mucuna* et du sol nu ont été trois fois plus faible à 70 JAS, puis d'environ 1,5 fois à 85 JAS. Cette tendance n'a pas varié pour les quatre dates d'observation (Tableau 18). Ces résultats ont montré une croissance logarithmique du nombre de ces plants à différentes dates de relevé dès le premier comptage à 70 au 115^{ème} JAS (Tableau 18) quel que soit la couverture présente.

IV-3.2.3.4. Nombre total de *Striga asiatica* par stade de développement suivant les quatre dates d'observations (70, 85, 100 et 115 JAS) en fonction de sa morphologie

Les différents stades de développement ont été constitués par l'apparence de *Striga asiatica* dans les parcelles : petites (les plantes inférieures à 5 cm), croissantes (les plantes supérieures à 5 cm sans fleurs), fleuries (les plantes portant de fleurs), sénescences (les plantes fanées) et mortes (les plantes desséchées). Pour les quatre dates de comptage, des effets significatifs du stade de développement de *S. asiatica* ainsi que du paillage jusqu'au 100^{ème} JAS ont été remarqués sur le nombre total de pieds de *S. asiatica* (Tableau 19). Les mêmes observations ont été constatées sur leurs interactions.

Tableau 19 : Analyse de la variance de la densité moyenne de *Striga asiatica* par dates d'observation, en fonction des différents types de paillages (P), des stades de développement (Ph) et de leur interaction.

Source	ddl	70 JAS		85 JAS		100 JAS		115 JAS	
		F	P	F	P	F	P	F	P
Bloc	5	0,49	0,7780	0,90	0,4977	9,57	< 0,0001	2,74	0,0418
Paillage (P)	5	14,46	< 0,0001	5,82	0,0011	4,09	0,0075	1,04	0,4148
Phase (Ph)	5	958,36	< 0,0001	612,95	< 0,0001	135,70	< 0,0001	233,80	< 0,0001
P x Ph	25	5,24	< 0,0001	3,19	< 0,0001	2,64	< 0,0001	1,28	0,1690

Dates d'observation : 70, 85, 100 et 115 JAS ; Paillages du sol : sol nu, inerte, *M. pruriensis*, *V. unguiculata*, *V. umbellata* et *S. guianensis* ; Stades de développement : petites, croissantes, fleuries et fructifiées. ddl : degré de liberté ; F : test de Fisher ; P : probabilité ; JAS : jours après semis.

Les graphes de la Figure 22 représentent l'évolution du développement de la population de *S. asiatica* sur les quatre dates de relevés. A 70 JAS, trois types de plantes sont rencontrés : des jeunes pousses (petites plantes <5 cm), des plantes en croissance et des plantes en fleurs. Les premières y ont été dominantes, avec un maximum pour le paillis *Stylosanthes* et le haricot-riz (>80 pieds.m⁻²). A 85 JAS, les mêmes tendances que les précédentes observations

ont été remarquées. Toutefois, les nombres de *S. asiatica* de chaque stade ont été plus élevés. A 100 JAS, une augmentation des plantes en fleurs et une diminution considérable des plantes en croissance sont constatées. C'est la période où la floraison a été maximale. Les plants de *S. asiatica* ont beaucoup fleuri sur l'association de couverture de niébé (90 plants.m⁻²) et des deux témoins (68 plants.m⁻²). Ils ont porté plus de capsules sur *M. pruriensis* et *V. umbellata* (42 plants.m⁻²). A 115 JAS, les petites plantes se faisaient rares, et ont laissé la place pour les plantes en fin de cycle ; c'est-à-dire les fanées et les morts ainsi que les porteurs de capsules. Ici, les paillages n'ont plus d'effet sur l'effectif de ces plantes parasites. Globalement, les résultats ont montré que la phase de fin de cycle du *S. asiatica* a eu lieu à partir du 100^{ième} JAS mais leur maximum a été trouvé à la fin du comptage (110 JAS). Le rapport entre le taux de mortalité et le taux de sénescence des plantes parasites a été proportionnel (Figure 22).

IV-3.2.4. Productions de *Striga asiatica* à la fin de son cycle : capsules et biomasses

IV-3.2.4.1. Quantité de capsules de *Striga asiatica* produite au cours de son cycle

La quantité de capsules produites par *S. asiatica*, des différents paillis, a été indépendante de la nature du paillage de son milieu. En moyenne, pour tous les traitements, les plantes de *S. asiatica* ont émis 606 capsules par m⁻² dans les parcelles.

IV-3.2.4.2. Matières et le taux de matières sèches de *Striga asiatica*

Les quantités de matière sèche de *S. asiatica* et le taux de ses matières sèches (Tableau 20) ont significativement résulté de la couverture du sol testée. Les matières sèches de *S. asiatica* sur le sol nu et sur *Mucuna* ont eu des quantités de matière fraîche quasi similaire, avec des taux de matières sèches opposés. Pour les sols nus, la matière sèche de *S. asiatica* a été de 31 % supérieure que celle rencontrée pour *mucuna* (Tableau 20). Le rapport entre la matière sèche et la biomasse a indiqué que les couvertures du sol ont joué un rôle non négligeable dans l'accumulation de l'eau par *S. asiatica* (Figure 23). Les quantités de *S. asiatica* prélevées sous les traitements de *S. guianensis*, de *V. umbellata* et de *M. pruriensis* ont été significativement inférieures aux autres traitements au niveau du poids sec et du taux des matières sèches. La quantité de *S. asiatica* récoltée sous les paillis de *Stylosanthes* était significativement inférieure de 46,7% au niveau de poids sec et inférieure de 32 % au niveau de la matière sèche par rapport par rapport au sol nu.

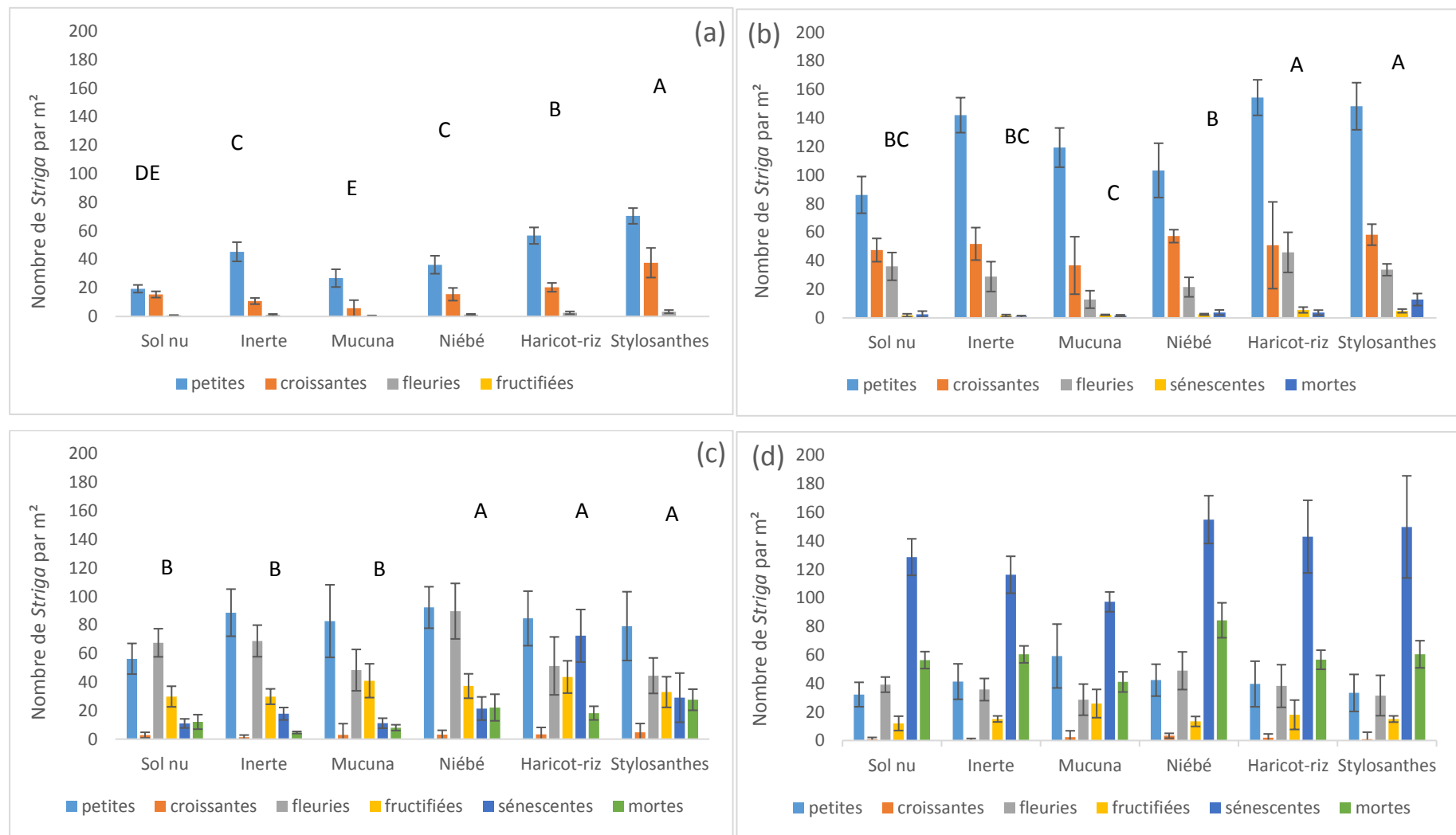


Figure 22 : Répartition du *Striga asiatica* dans le temps : (a) : 70 JAS, (b) : 85 JAS (c) : 100 JAS et (d) : 115 JAS ; en fonction des paillages du sol et des étapes de son cycle biologique.

Concernant le témoin inerte, le poids sec a été plus élevé au niveau de la matière sèche, alors que le pourcentage de matière sèche a été quasi similaire comparé à ceux des légumineuses.

Tableau 20 : Analyse de la variance du poids et du taux de matières sèches moyennes de *Striga asiatica* au moment de la récolte, avec la comparaison de leurs moyennes en fonction des paillages du sol.

	Source	ddl	Matière sèche (g.m ⁻²)		Matière sèche (%)	
			F	P	F	P
ANOVA	Bloc	5	1,22	0,329	9,49	< 0,0001
	Paillage	5	5,27	0,002	2,61	0,049
Comparaison des moyennes	Sol nu		26,8	abc ¹	28,1	a
	Inerte		36,4	a	22,3	bc
	<i>Mucuna pruriensis</i>		21,1	bcd	19,3	c
	<i>Vigna unguiculata</i>		31,6	ab	25,2	ab
	<i>Vigna umbellata</i>		20,3	cd	23,4	abc
	<i>Stylosanthes guianensis</i>		14,3	d	19,1	c
sed (P)			5,201		2,672	

¹Les valeurs suivies de lettres sont significativement différentes à $P < 0,05$, selon le test de Fischer.

Paillages du sol : sol nu, inertes, niébé, *Mucuna*, haricot-riz et *Stylosanthes*.

ddl : degré de liberté ; F : test de Fisher ; P : probabilité ; JAS : jours après semis

La figure 23 suivante révèle le pourcentage d'eau accumulé dans la plante parasite. Les plantes de *S. asiatica* récoltées sur les paillis de *Stylosanthes* ont plus d'eau que de matières sèches dans leurs appareils végétatifs aériens.

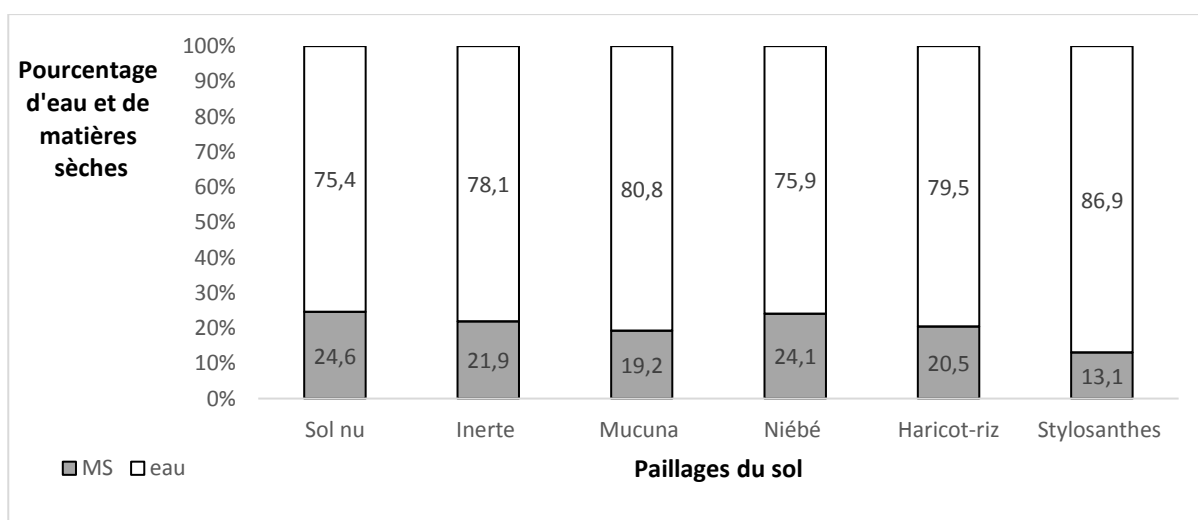


Figure 23 : Teneur en eau et taux de matières sèches de *Striga asiatica* des différents paillages du sol

Paillages du sol : sol nu, inertes, niébé, *Mucuna*, haricot-riz et *Stylosanthes*.

IV-4. Discussions

IV-4.1. Impacts des paillages sur le microclimat du sol

Différents facteurs ont été mis en évidence sur une campagne agricole à partir d'une expérimentation au champ avec une infestation additive de graines de *S. asiatica*, dont la température, l'humidité du sol et l'effet de la nature de la couverture végétale. Cette dernière a eu une masse constante d'environ 10 t de matière sèche de manière à atteindre une couverture totale de sol à 100%.

La température du sol a montré des effets significatifs entre les sols couverts et les sols nus. Ces derniers ont été plus chauds que les sols sous paillages dans les premières profondeurs du sol (0-5cm), quel que soit le niveau de l'amplitude thermique. Cette étude a ainsi confirmé les résultats de Prihar et *al.* (1977) et Cook et *al.* (2006) sur la réduction des températures du sol des premiers horizons par la mise en place de paillage. C'est l'effet d'écran donné par les paillages du sol.

Concernant l'humidité du sol, des effets peu significatifs ont été également constatés entre la nature des couvertures végétales du sol avec une meilleure rétention d'eau du témoin (paillis inertes) et celui du paillis de haricot-riz. Ces paillis inertes et de haricot-riz ont eu une consistance plus ou moins épaisse pour couvrir le sol. En effet, les biomasses de haricot-riz ont été plus riches en feuillage que de tiges par rapport aux biomasses des autres légumineuses utilisées. Les travaux réalisés par Scopel et *al.* (2004) ont montré que le taux d'humidité plus élevé retrouvé dans ces traitements est lié à la surface couverte de paillis, inversement proportionnel à la perte d'eau par l'évaporation. Prihar et *al.*, (1977) et de Unger et Merle (1998) ont également confirmé la réduction de l'évaporation de l'eau à la surface et l'amélioration de l'infiltration de l'eau, ainsi que la conservation de l'eau par la présence des paillages du sol. Par conséquent, ces effets de rétention d'eau dépendraient de l'espèce de la plante de couverture dont la paille est composée par plus de feuillage.

IV-4.2. Influence de la nature des couvertures sur l'émergence de *Striga asiatica*

Les facteurs d'émergence de *S. asiatica* ont été aussi observés dans cette étude. Les résultats ont montré des effets significatifs de la couverture végétale du sol sur le nombre de *S. asiatica* levés. Ils ont été remarqués sur les premières dates d'observation à 70 et 85 JAS. Cependant, aucun effet significatif n'a été ensuite relevé sur les deux dernières dates d'observation (100 et 115 JAS). A 70 JAS, un nombre plus élevé de *S. asiatica* a été observé

avec les couvertures du sol avec les légumineuses *V. unguiculata*, *V. umbellata* et *S. guianensis* et la couverture inerte par rapport à un sol nu et au *M. pruriensis*. A partir de 100 JAS, les couvertures du sol par les paillages n'ont plus influencé la croissance et le développement de *S. asiatica*, en effet *S. asiatica* a atteint sa maturité, et plus ou moins indépendant de sa plante hôte et de son milieu.

Le développement retardé de la population de *S. asiatica* sous les paillis de *Mucuna* a été probablement dû à des effets allélopathiques éventuels de cette légumineuse. Le niébé, le haricot-riz et *Stylosanthes* quant à eux, ont provoqué une stimulation de *S. asiatica* à tous les niveaux, particulièrement, la levée, la croissance, la floraison, la sénescence et même les biomasses produites par *S. asiatica*. Ce résultat affirme les travaux de Khan (2006) sur la présence de composés stimulants la germination des plantes parasites et de *Stylosanthes*. En effet, la plupart des légumineuses ont des effets allélopathiques sur certaines plantes environnantes. Selon Khan et al. (2006), *Stylosanthes* est un stimulant de la germination des graines des adventices. L'infestation majeure sous ce traitement est par la suite vérifiée. *Mucuna* est un inhibiteur présentant des composés répulsifs des insectes et des mauvaises herbes (Y Fujii et al., 1991). Ce qui confirme le retard du développement de la croissance de *S. asiatica* dans tous nos résultats. Ensuite, le niébé, stimulateur de germination de *Striga spp.* également (Müller et al., 1992 ; Lawane et al., 2009), a bien favorisé la croissance de la population de *S. asiatica* au champ.

Des études ont montré que la lumière peut jouer sur la germination et le développement des graines (De Saussure, 1804). Etant donné que la germination de *Striga spp.* est sensible à la lumière (Kumar, 1940), l'apport d'une couverture suffisante au sol serait utile pour réduire l'induction à la germination. Dans la présente étude, les couvertures des légumineuses n'ont certes pas réduit le passage des rayons lumineux à travers les couches de paillis pour atteindre les graines de *Striga asiatica*, cependant les effets du retard de la levée de ces plantes ont été plutôt évalués au niveau des facteurs biochimiques comme pour le cas des traitements avec *Mucuna*.

IV-4.3. Influence des facteurs températures et microclimats sur l'émergence de *Striga asiatica*

Au niveau de la température pour tous les types de couvertures du sol observés, les résultats obtenus ont tous indiqué des températures moyennes et maximales de la journée pendant environ ces 16 semaines, allant autour de 25 à 35°C. Comme les études de Parker (1965) ont démontré que la levée de dormance d'une graine de *S. asiatica* est favorisée par

une température comprise en 28 à 32°C, dans les conditions offertes par notre milieu d'étude, les levées de *S. asiatica* n'ont pas été ainsi limitées par la présence de ces couvertures du sol. Au niveau de l'humidité, nous avons constaté que les sols sous tous les traitements (nus ou couverts) ont présenté un léger taux d'humidité (entre 12 à 28%) juste nécessaire pour les besoins des plantes. L'essai expérimental étant situé en colline, aucune submersion d'eau (100% d'humidité) n'a été observée même après une forte pluie. Cette rétention d'eau moyenne sous les sous couverts et les sols nus ont favorisé la stimulation de la levée de ces plantes parasites, variables en fonction des traitements. Contrairement aux observations faites par Kabiri et *al.* (2015) qui ont montré que les infestations de *S. asiatica* sont favorables en milieu légèrement humide, nous avons remarqué que l'infestation se développait plus sur les sols moins humides comme ceux avec *Stylosanthes*, alors que les paillis de haricot-riz et inerte retenant plus d'eau dans l'ensemble, ont eu moins de plantes parasites de même que les sols nus. En sachant que, d'après les études faites par Olivier (1995) ainsi que ceux de Ransom et Njoroge (1991), le pré-conditionnement des graines de *S. asiatica* pour acquérir la capacité de germination nécessite une légère humectation associée à la chaleur. Il est fort probable que l'effet d'humidité sur *S. asiatica* ne se montrera pas pendant la première saison car l'humidité favoriserait surtout le développement des microorganismes du sol (Ponge et *al.*, 1986 ; Arpin et *al.* 1986), telles que moisissures, bactéries, prédateurs etc. qui pourraient à leur tour réduire la viabilité des graines de *Striga asiatica*.

IV-5. Conclusion partielle

Cette expérimentation annuelle au champ réalisée avec une infestation contrôlée de graines de *Striga asiatica* au moment du travail du sol a permis de comparer l'effet séparé des différentes légumineuses testées dans les chapitres 2 et 3 sur l'expérimentation pérennisée sur 4 années. L'infestation artificielle de *S. asiatica* a été très élevée aboutissant en cours de cycle à 313,7 pieds.m⁻² sur la variété de riz sensible B22.

Aux quatre paillages de légumineuses appliqués à la même dose sur la base de 10 t.ha⁻¹ de matière sèche de manière à avoir une couverture du sol optimale, deux traitements supplémentaires ont été rajoutés, à savoir un sol nu et un sol couvert par un paillage inerte (également 10 t.ha⁻¹ de matière sèche).

La comparaison entre une gestion sous sol nu et avec un paillage inerte a montré un effet important de réduction des températures maximales relevées à 2,5 cm du sol qui sont inférieures en moyenne de 43 % (53,1°C sous sol nu et 37,0°C sous mulch inerte). Egalement des effets significatifs ont été observés sur l'humidité entre ces 2 modes de gestion du sol

avec une plus forte humidité du sol sous paillage. Néanmoins aucun effet significatif entre ces traitements contrastés n'est apparu à la fois sur les dates de levée et de floraison, ainsi que sur le nombre de *S. asiatica*.

Par contre un effet significatif avec le paillage de *Mucuna* est apparu avec un retard d'environ 8 à 10 jours de la date d'apparition de *S. asiatica* par rapport aux autres légumineuses et d'environ 5 jours par rapport au mulch inerte. Cet effet de *Mucuna* est encore observable et significatif sur la date de floraison avec un retard de 4 à 6 jours par rapport aux autres légumineuses et d'environ 5 jours par rapport au mulch inerte.

Egalement une réduction significative du nombre de *S. asiatica* avec mulch de *Mucuna* est apparue par rapport au mulch inerte à 70 et 85 JAS. Ces réductions sont respectivement de 40,3 % et de 21,6 %.

L'ensemble de ces résultats indique donc un potentiel d'action d'allélopathique de *Mucuna* sur *Striga asiatica* déjà suggéré par Kiwia et *al.* avec *Striga hermonthica* (2009). D'autres modes de gestion du sol ont eu des effets significatifs sur les densités de *S. asiatica* avec des stimulations (effet positif) notamment avec les paillages de *Vigna umbellata* et de *Stylosanthes guianensis*.

Les rôles des paillages des légumineuses ne se limitent pas seulement à la conservation de l'humidité et à la réduction de la température ; les paillis peuvent aussi réduire la qualité de la lumière arrivant au sol. En effet, la germination de certaines graines est induite par la lumière rouge sombre R (red), par capture des phytohormes, alors que la lumière rouge lointain FR (far red) inhibe la germination. Comme les plantes de couverture créent de l'ombrage, disséquer la composition de la lumière traversant les différents types de résidus de cultures et arrivant au sol, pourrait mieux contribuer à l'amélioration de la qualité de ces paillis. Par conséquent, cette étude pourrait montrer non seulement la diminution de la germination des graines de *S. asiatica* mais aussi celles des autres plantes adventices. Ainsi l'ajustement de la quantité de paillage apportée au sol pourrait être réalisé en fonction de leur qualité d'absorption de la lumière (Ranaivoson et *al.*, 2017).

Conclusion générale et perspectives

La présence de *Striga asiatica* est l'une des contraintes majeures pour le riz et le maïs, principales cultures vivrières du Moyen Ouest du Vakinankaratra. En absence de prise de mesure, la production du riz pluvial dans cette zone reste un réel défi autant pour les agriculteurs que pour la recherche agronomique.

Ce travail de thèse nous a permis d'estimer pour la première fois dans cette région l'importance particulière des variétés de riz et de la combinaison des systèmes de cultures en agriculture de conservation, associant le maïs avec différentes légumineuses pendant sa croissance.

Dans la première partie, nous avons pu ressortir deux modalités de contrôle de *S. asiatica* qui sont le contrôle par la voie génétique et le contrôle par la voie culturale dans des systèmes de cultures basées sur l'Agriculture de Conservation. L'infestation reste faible avec la présence de *Stylosanthes guianensis* dans le système de culture associé à la variété du riz NERICA-4. Dans la deuxième partie, l'évaluation de l'impact de l'agriculture de conservation sur les cultures du riz et du maïs et de leur milieu a permis de montrer les effets positifs à court et moyen terme de ce système de culture dans une zone potentiellement sujette au stress hydrique. Au niveau de la production des cultures hôtes, les rendements du riz en AC tendent à s'améliorer dans le temps avec des augmentations de l'azote total du sol en surface lié à des apports importants en fumures organiques, ainsi que des réductions de l'érosion de la surface du sol. Enfin, dans la dernière partie, la dissociation des effets des plantes vives avec les effets des plantes mortes ou paillages a permis de distinguer les facteurs éventuels qui pourraient empêcher la croissance et le développement de *S. asiatica* au champ. Les paillages de *Mucuna pruriens* pourraient être ainsi une plante ayant potentiellement des effets d'inhibition de *S. asiatica*. Cette inhibition s'est traduite par le retard de la levée et de la croissance des plants de *S. asiatica* par rapport à ceux des autres couvertures mortes.

Les effets de stimulation positive identifiés avec les couvertures mortes de haricot-riz et de *Stylosanthes* accélèrent la croissance et la prolifération de *S. asiatica* en leur présence. Ces effets allélopathiques ont été étudiés et mis en annexe mais leurs résultats n'ont pas pu valider ces effets d'allélopathie négative ou de germination suicide à travers la production d'exsudats racinaires en milieu confiné. Il conviendrait alors de séparer les effets racinaires de ceux obtenus par les parties aériennes.

Le fait que quelque soit le système de culture nous avons constaté une augmentation du stock semencier de *S. asiatica* dans le sol entre le début et la fin de l'essai, au bout de quatre années de culture, nous amène à nous poser la question de savoir si dans une rotation culturale riz-maïs, le maïs serait-il un bon précédent cultural pour le riz ? Etant donné les faibles

niveaux de fertilité du sol présents dans la région en domaine pluvial du fait de l'insuffisance des apports organiques et le faible recours à des engrais de synthèse, il semblerait préférable d'utiliser des plantes non hôtes de *S. asiatica* dans la rotation culturale et d'éviter le maïs dans les systèmes à base de riz. En plus les rendements en maïs sont restés faibles durant ces quatre années de culture contrairement à ceux du riz et cela pour tous les systèmes de culture, sauf en quatrième année après rajout de P (phosphore) sous une forme minérale. Cet élément est très faiblement présent contrairement à l'azote dans la fumure organique et nos résultats confirment l'importance de P pour la culture de maïs.

La combinaison des pratiques de l'AC et d'une variété résistante ne s'est donc pas montrée suffisante en présence de maïs pour empêcher totalement le développement du parasitisme de *S. asiatica*. Les légumineuses étudiées ne sont pas très courantes chez les agriculteurs de notre zone d'étude et il conviendrait d'étudier d'autres espèces, notamment l'arachide et le pois de terre pour répondre aux besoins des agriculteurs, avec un point focal sur la germination suicide.

Références bibliographiques

1. Africa Rice Center (2008). NERICA: the New Rice for Africa – a Compendium. *Somado, E. A., Guei, R. G. et Keya, S. O.*, 210 p.
2. Alam, A. (2014). Degradation: A challenge to sustainable agriculture, *International journal of scientific research in agriculture sciences*, **4**: 50-55.
3. Aliyu, L., Lagoke, S.T.O., Carsky, R.J., Kling, J., Omotayo, O. et Shebayan, J.Y. (2004). Technical and economic evaluation of some *Striga* control packages in maize in the Nigerian Guinea Savanna. *Crop Protection*, **23**: 65-69.
4. Altieri, M.A. (1995). Agroecology: the science of sustainable agriculture. *Westview Press*, Boulder, Colorado. 433 p.
5. Amado, T.J.C., Bayer, C., Conceicao, P.C., Spagnollo, E., de Campos, B.H.C. et da Veiga, M. (2006). Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in southern Brazil. *Journal of Environmental Quality*, **35**: 1599-1607.
6. Andrianaiivo, A.P. et Razafindramamba R. (1993). Le *Striga*-angamay (*Striga asiatica*). *Ministère de l'agriculture*. Fiche technique de la protection des végétaux **42** : 4p.
7. Andrianaiivo, A.P., Kachelriess, S., Kroschel, J. et Zehrer, W., (1998) Biologie et gestion du *Striga* à Madagascar. *Direction des protections des végétaux*, FCV/RFA- GTZ, 61 p.
8. Arpin, P., David, J-F., Guittonneau, G-G., Kilbertus, G., Ponge, J-F. et Vannier, G. (1986). Influence du peuplement forestier sur la faune et la microflore du sol et des humus : I. Description des stations et étude de la faune du sol. *Revue d'Ecologie et de Biologie du sol*, **23**: 89-118.
9. Ayongwa, G.C. (2011). Understanding the diverse roles of soil organic matter in the cereal-*Striga hermonthica* interaction. *Thèse de doctorat*, Wageningen University. 132 p.
10. Balasubramanian, V., Sie, M., Hijmans, R.J. et Otsuka, K. (2007). Increasing Rice Production in Sub-Saharan Africa: Challenges and Opportunities. *Advances in Agronomy*, **94**: 55-133.
11. Barthes, B., Azontonde, A., Blanchart, E., Girardin, C., Villenave, C., Lesaint, S., Oliver, R. et Feller, C. (2004). Effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. utilis) on soil carbon in an Ultisol under maize cultivation in southern Benin. *Soil Use and Management*, **20**: 231-239.
12. Bastitini, R. (1996). Paléogéographie et variété des milieux naturels à Madagascar et dans les îles voisines : quelques données de base pour l'étude biogéographique de la « région malgache ». *Biogéographie de Madagascar*, **1**: 1-7.
13. Becker, M. et Johnson, D.E. (1999). The role of legume fallows in intensified upland rice-based systems of West Africa. *Development in Plant and Soil Sciences*, **81**: 105-120.

14. Bouwmeester, H.J., Matusova, R., Zhongkui, S. et Beale, M.H. (2003). Secondary metabolite signaling in host–parasitic plant interactions. *Current Opinion in Plant Biology*, **6**: 358–364.
15. Bremner, J.M. (1965). Total Nitrogen. Dans: Methods of soil analysis, 2^e partie. *American Social Agronomy Madison*. 1149-1178.
16. Brouder, S.M. et Gomez-Macpherson, H. (2014). The impact of conservation agriculture on smallholder agricultural yields: A scoping review of the evidence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **187**: 11-32.
17. Bruelle, G., Naudin, K., Scopel, E., Domas, R., Rabeharisoa, L. et Tittone, P. (2015). Short- to mid-term impact of conservation agriculture on yield variability of upland rice: evidence from farmer's fields in Madagascar. *Experimental Agriculture*, **51**: 66-84.
18. Burton, M.G., Mortensen, D.A. et Marx, D.B. (2005). Environmental characteristics affecting *Helianthus annuus* distribution in a maize production system. *Agriculture Ecosystems and Environment*, **111**: 30–40.
19. Cairns, J.E., Sonder, K., Zaidi, P.H., Verhulst, N., Mahuku, G., Babu, R., Nair, S.K., Das, B., Govaerts, B., Vinayan, M.T., Rashid, Z., Noor, J.J., Devi, P., Vicente, F.S. et Prasanna, B.M. (2012). Maize production in a changing climate: impacts, adaptation and mitigation strategies. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*, **114**:1–58.
20. Calvet, C. (1980). Manuel de protection des végétaux. *J-B Baillière*. Paris, France. 198 p.
21. Carsky, R.J., Singh, L. et Ndikawa, R. (1994). Suppression of *Striga hermonthica* on sorghum using a cowpea intercrop. *Experimental Agriculture*, **30**: 349–358.
22. Chikoye, D., Ekeleme, F., Lum, A.F. et Schulz, S., (2008). Legume-maize rotation and nitrogen effects on weed performance in the humid and subhumid tropics of West Africa. *Crop Protection*, **27**: 638–647.
23. Cissoko, M., Boissard, A., Rodenburg, J., Press, M.C. et Scholes, J.D. (2011). New Rice for Africa (NERICA) cultivars exhibit different levels of post-attachment resistance against the parasitic weeds *Striga hermonthica* and *Striga asiatica*. *New Phytologist*, **192**: 952–963.
24. Cochrane, V. et Press, M. (1997) Geographical distribution and aspects of the ecology of the hemiparasitic angiosperm *Striga asiatica* (L.) Kuntze : A herbarium study. *Journal of Tropical Ecology*, **13**: 371-380.
25. Cook, C.E., Whichard, L.P., Wall, M.E., Egley, G.H., Coggan, P., Luhan, P.A. et Mc Phail, A.T., (1972). Germination stimulants: II. The structure of strigol – a potent seed germination stimulant for witchweed (*Striga lutea* Lour). *Journal of American Chemical Society*, **94**: 6198-6199.

26. Cook, H.F., Valdes, G.S.B. et Lee, H.C. (2006). Mulch effects on rainfall interception, soil physical characteristics and temperature under *Zea mays* L. *Soil and Tillage Research*, **91**: 227-237.
27. De Groote, H., Wangare, L., Kanampiu, F., Odendo, M., Diallo, A., Karaya, H. et Friesen, D. (2008). The potential of an herbicide resistant maize technology for *Striga* control in Africa. *Agricultural System*, **97**: 83-94.
28. De Groote, H., Vanlauwe, B., Rutto, R., Odhiambo, G.D., Kanampiu F. et Khan Z.R. (2010). Economic analysis of different options in integrated pest and soil fertility management. in maize systems of Western Kenya. *Agricultural Economics*, **41**: 471-482.
29. De Saussure, T. (1804). Recherches chimiques sur la végétation : *Nyon Librairie*. Paris, France. 327p.
30. Dingkuhn, M., Jones, M.P., Johnson, D.E. et Sow, A. (1998). Growth and yield potential of *Oryza sativa* and *O. glaberrima* upland rice cultivars and their interspecific progenies. *Field Crops Research*, **57**: 57-69.
31. Doggett, H. (1984). *Striga* - its biology and control. An overview. In *the Workshop on Biology and Control of Striga*, CRDI/ICSU Press, Dakar, Senegal.
32. Domas, R., Penot, E. Andriamalala, H. et Chabierski, S. (2008). Quand les *tanety* rejoignent les rizières au Lac Alaotra : Diversification et innovation sur les zones exondées dans un contexte foncier de plus en plus saturé. *Document de travail*, AFD. 27 p.
33. Dusserre, J., Chopart, J.L., Douzet, J.M., Rakotoarisoa, J. et Scopel, E. (2012). Upland rice production under conservation agriculture cropping systems in cold conditions of tropical highlands. *Field Crops Research*, **138**: 33-41.
34. Dusserre, J., Raveloson, H., Michellon, R., Gozé, E., Auzoux, S. et Sester, M. (2017). Conservation agriculture cropping systems reduce blast disease in upland rice by affecting plant nitrogen nutrition. *Field Crops Research*, **204**: 208-221.
35. Ejeta, G. et Butler L.G. (1993). Host-Parasite Interactions Throughout the *Striga* Life Cycle, and their Contributions to *Striga* Resistance. *African Crop Science Journal*, **1**: 75-80.
36. Elliot, P.C., Clarisse, R.N., Beby, R. et Josue, H.R. (1993). Weeds in rice in Madagascar. *International Rice Research Notes*, **18**: 53-54.
37. Ellis-Jones, J., Schulz, S., Douthwaite, B., Hussaini, M.A., Oyewole, B.D., Olanrewaju, A.S. et White, R. (2004). An assessment of integrated *Striga hermonthica* control and early adoption by farmers in Northern Nigeria. *Experimental Agriculture*, **40**: 353-368.
38. Elzein, A. et Kroschel, J. (2004). *Fusarium oxysporum* Foxy 2 shows potential to control both *Striga hermonthica* and *S. asiatica*. *Weed Research*, **44**: 433-438.

39. Erenstein, O. (2002). Crop residue mulching in tropical and semi-tropical countries: An evaluation of residue availability and other technological implications. *Soil and Tillage Research*, **67**: 115-133.
40. Fairhurst, T., Witt, C., Buresh, R.J. et Dobermann, A. (2002). Rice: a practical guide to nutrient management. In *International Rice Research Institute (IRRI)*, Metro Manila, Philippines.
41. Fardeau, J-C., Morel, C. et Boniface, R. (1988). Pourquoi choisir la méthode Olsen pour estimer le phosphore "assimilable" des sols? *Agronomie*, **8**: 577-584.
42. Fujii, Y. (2003). Allelopathy in the natural and agricultural ecosystems and isolation of potent allelochemicals from Velvet bean (*Mucuna pruriensis*) an Hairy vetch (*Vicia villosa*). *Biological Sciences in Space*, **17**: 6-13.
43. Gbehounou, G. et Adango, E. (2003). Trap crops of *Striga hermonthica*: in vitro identification and effectiveness in situ. *Crop Protection*, **22**: 395-404.
44. Geiger, U., Kroschel, J. et Sauerborn, J. (1996). *Striga asiatica*, a problem in the Middle West of Madagascar. In: Moreno, M.T., Cubero, J.I., Berner, D.K., Joel, D., Musselman, L.J., Parker, C. (Eds.), *Advances in Parasitic Research*. Proceedings of the Sixth International Parasitic Weed Symposium. Sevilla. 479-486.
45. Gethi, J.G., Smith, M.E., Mitchell, S.E. et Kresovich, S. (2005). Genetic diversity of *Striga hermonthica* and *Striga asiatica* populations in Kenya. *Weed Research*, **45**: 64-73.
46. Giller, K.E (2001). Nitrogen fixation in tropical cropping systems. In *CAB International*, Wallingford (UK).
47. Giller, K.E., Witter, E., Corbeels, M. et Tittonell, P. (2009). Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. *Field Crops Research*, **114**: 23-34.
48. Giller, K.E., Corbeels, M., Nyamangara, J., Triomphe, B., Affholder, F., Scopel, E. et Tittonell, P. (2011). A research agenda to explore the role of conservation agriculture in African smallholder farming systems. *Field Crops Research*, **124**: 468-472.
49. Hartman, G.L. et Tanimonure, O.A. (1991). Seed population of *Striga* species in Nigeria. *Plant Diseases*. **75**: 494-496.
50. Hoffmann, G., P., Marnotte, P. et Dembélé, D. (1997). Emploi d'herbicides pour lutter contre *Striga hermonthica*. *Agriculture et développement*, **13**: 58-62.
51. Husson, O., Michellon, R., Charpentier, H., Razanamparany, C., Moussa, N., Naudin, K., Razafintsalama, H., Rakotoarinivo, C., Andrianaivo, A.P. et Seguy, L. (2008). Le contrôle du striga par les SCV (Semis direct sur couverture végétal permanente). *Manuel pratique du semis direct à Madagascar*. CIRAD **1**: 20p.
52. Institute, S. (2011). The SAS System for Windows; Version 9.2. *SAS Institute Inc Cary, NC, USA*.

53. Jamil, M., Charnikhova, T., Cardoso, C., Jamil, T., Ueno, K., Verstappen, F., Asami, T. et Bouwmeester, H. (2011). Quantification of the relationship between strigolactones and *Striga hermonthica* in rice under varying levels of nitrogen and phosphorus. *Weed Research*, **51**: 373–385.
54. Jamil, M., Kanampiu, F.K., Karaya, H., Charnikhova, T. et Bouwmeester, H.J. (2012). *Striga hermonthica* parasitism in maize in response to N and P fertilizers. *Field Crops Research*, **134**: 1-10.
55. Joel, D.M., Steffens, J.C. et Matthews, D.E. (1995). Germination of weedy root parasites. In *Seed Development and Germination*, New York, USA: 567 – 597.
56. Joel, D.M., Hershenhorn, J., Eizenburg, H., Aly, R., Ejeta, G. et Rich, P.J. (2007). Biology and management of weedy root parasites. *Horticultural Reviews*, **33**: 267-349.
57. Joel, D.M., Gressel, J. et Musselman L. J. (2013). Parasitic Orobanchaceae: Parasitic Mechanisms and Control Strategies. *Springer*, 518 p.
58. Johnson, D.E., Riches, C.R., Diallo, R. et Jones, M.J. (1997). *Striga* on rice in West Africa; crop host range and the potential of host resistance. *Crop Protection*, **16**: 153–157.
59. Jones, M.P., Dingkuhn, M., Aluko, G.K. et Semon, M. (1997). Interspecific *Oryza sativa* L x *O. glaberrima* Steud. progenies in upland rice improvement. *Euphytica*, **94**: 237–246.
60. Joyeux, C. (2010). Proposition d'un cahier de charges pour la conception de système de culture en Agriculture de Conservation dans le Moyen Ouest du Vakinankaratra à Madagascar. Mémoire d'Ingéniorat, *Université de Lorraine*. 63p.
61. Kabiri, S., Rodenburg, J., Kayeke, J., Ast, A.V., Makokha, D.W., Msangi, S.H., Irakiza, R. et Bastiaans, L. (2015). Can the parasitic weeds *Striga asiatica* and *Rhamphicarpa fistulosa* co-occur in rain-fed rice?. *Weed Research*, **55**: 145-154.
62. Kamara, A.Y., Ellis-Jones, J., Amaza, P., Omoigui, L.O., Helsen, J., Dugje, I.Y., Kamai, N., Menkir, A. et White, R.W. (2008). A participatory approach to increasing productivity of maize through *Striga hermonthica* control in northeast Nigeria. *Experimental Agriculture*, **44**: 349–364.
63. Kamara, A.Y., Ekeleme, F., Jibrin, J.M., Tarawali, G. et Tofa, I. (2014). Assessment of level, extent and factors influencing *Striga* infestation of cereals and cowpea in a Sudan Savanna ecology of Northern Nigeria. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **188**: 111–121.
64. Khan, T.D., Hong, N.H., Nhan, D.Q., Kim, S.L., Chung I.M., et Xuan, T.D. (2006). Herbicidal activity of *Stylosanthes guianensis* and its phytotoxic components. *Journal of Agronomy and Crop Science*, **192**: 427-433.
65. Khan, Z.R., Pickett, J.A., van den Berg, J., Wadhams L.J. et Woodcock, C.M. (2000). Exploiting chemical ecology and species diversity : stem boreans *Striga* control for maize and sorghum in Africa. *Pest Management Science*, **56**: 957-962.

66. Khan, Z.R., Ahmed, H., Overholt, W., Khamis, T.M., Hooper, A.M., Pickett, J.A., Wadhams, L.J. et Woodcock, C.M. (2002). Control of witchweed *Striga hermonthica* by intercropping with *Desmodium spp.*, and the mechanism defined as allelopathic. *Journal of Chemical Ecology*, **28**: 1871-1885.
67. Khan, Z.R., Pickett, J.A., Hassanali, A., Hooper, A.M. et Midega, C.A.O. (2008a). *Desmodium* species and associated biochemical traits for controlling *Striga* species: present and future prospects. *Weed Research*, **48**: 302-306.
68. Kijoji, A.A., Nchimbi-Msolla, S., Kanyeka, Z.L., Serraj, R. et Henry, A. (2014). Linking root traits and grain yield for rainfed rice in sub-Saharan Africa: Response of *Oryza sativa* × *Oryza glaberrima* introgression lines under drought. *Field Crops Research*, **165**: 25-35.
69. Kiwia, A., Imo, M., Jama, B. et Okalebo, J.R. (2009). Coppicing improved fallows are profitable for maize production in *Striga* infested soils of western Kenya. *Agroforestry Systems*, **76**: 455-465.
70. Knowler, D. et Bradshaw, B. (2007). Farmers' adoption of conservation agriculture: A review and synthesis of recent research. *Food Policy*, **32**: 25-48.
71. Kulkarni, S.S., Dosdall, L.M., Spence, J.R. et Willenborg, C.J. (2015). Depth of seed burial and gender influence weed seed predation by three species of ground beetle (Coleoptera: carabidae). *Weed Sciences*, **63**: 910-915.
72. Kumar, L.S.S. et Salomon, S. (1940). The influence of light on the germination of species of *Striga*. *Current Science*, **9**, 540.
73. Lagoke, S.T.O., Parkinson, V. et Agunbiade, R.M. (1991). Parasitic weeds and control methods in Africa. In Congress International, *Combating Striga in Africa*, International Institute for Tropical Agriculture. Ibadan, Nigeria.
74. Lal, R. (1997). Degradation a resilience of soil. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London British*, **352**: 997-1010.
75. Lawane, G., Sougnabe, S.P., Lenzemo, V., Gnokreo, F., Djimasbeye, N. et Ndoutamia, G. (2009). Efficacité des céréales et du niébé pour la production de grains et la lutte contre *Striga hermonthica* (Del.). In *Actes de colloque Savane africaines en développement : innover pour durer*. Garoua, Cameroun.
76. M'biandoun, M., Guibert, H. et Olin, J-P (2002). Caractérisation de la fertilité du sol en fonction des mauvaises herbes présentes. *CIRAD- PRASAC*, 8p.
77. Masvaya, E.N., Nyamangara, J., Descheemaeker, K. et Giller, K.E. (2017). Is maize-cowpea intercropping a viable option for smallholder farms in the risky environments of semi-arid southern Africa ?. *Field Crops Research*, **209**: 73-87.
78. Matusova, R., Rani, K., Verstappen, F.W.A., Franssen, M.C.R., Beale, M.H. et Bouwmeester, H.J. (2005). The strigolactone germination stimulants of the plant-parasitic *Striga* and *Orobanch* spp. Are derived from the carotenoid pathway. *Plant Physiology*, **139**: 920-934.

79. Mazoyer, M. et Roudart, L. (1987). Pourquoi une théorie des systèmes agraires ?. *Cahier d'agricultures*, **6**: 591-595.
80. Mémento de l'agronome (2002). La Lutte contre les mauvaises herbes. *CIRAD-GRET*. Paris, France. 1690 p.
81. Menge, D.M., Kameoka, E., Kano-Nakata, M., Yamauchi, A., Asanuma, S., Asai, H., Kikuta, M., Suralta, R.R., Koyama, T., Tran, T.T., Siopongco, J., Mitsuya, S., Inukai, Y. et Makihara, D. (2016). Drought-induced root plasticity of two upland NERICA varieties under conditions with contrasting soil depth characteristics. *Plant Production Science*, **19**: 389-400.
82. Michellon, R., Razanamparany, C., Moussa, N., Rakotovazaha, L., Hanitriniaina, F. J.C., Razakamanantoanina, R., Randrianaivo, S. et Rakotoarimanana, R. (2007). Projet d'appui à la diffusion des techniques agro-écologiques à Madagascar- Volet dispositif d'appui technique et formation- Rapport d'exécution : Haute Terre et Moyen Ouest-Rapport de campagne 2005-2006. *ONG TAFA-GSDM* : Document de travail. 80 p.
83. Midega, C.A.O., Pittchar, J., Salifu, D., Pickett, J.A. et Khan, Z.R. (2013). Effects of mulching, N-fertilization and intercropping with *Desmodium uncinatum* on *Striga hermonthica* infestation in maize. *Crop Protection*, **44**: 44-49.
84. Mohamed, K.I., Musselman, L.J. et Riches, C.R. (2001). The genus *Striga* (Scrophulariaceae) in Africa. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, **88**: 60-103.
85. Mounier, T. (2013). Les effets des SCV et des variétés de riz résistantes sur *Striga asiatica*. Rapport de stage, *Institut Universitaire de Technologie de La Réunion*, 20 p.
86. Müller, S., Hauck, C. et Schildknecht, H. (1992). Germination stimulants produced by *Vigna unguiculata* Walp. *Journal of Plant Growth Regulation*, **11**:77-84.
87. Musselman, L. J. (1987). Taxonomy and ecology. *Parasitic weeds in agriculture*, **1**: 3-12
88. Naudin, K., Scopel, E., Andriamandroso, A.L.H., Rakotosolofo, M., Ratsimbazafy, N., Rakotozandriny, J.N., Salgado, P. et Giller, K.E. (2012). Trade-offs between biomass use and soil cover: The case of rice-based cropping systems in the Lake Alaotra region of Madagascar. *Experimental Agriculture*, **48**: 194-209.
89. Naudin, K., Bruelle, G., Salgado, P., Penot, E., Scopel, E., Lubbers, M., de Ridder, N. et Giller, K.E. (2015a). Trade-offs around the use of biomass for livestock feed and soil cover in dairy farms in the Alaotra lake region of Madagascar. *Agricultural Systems*, **134**: 36-47.
90. Naudin, K., Husson, O., Scopel, E., Auzoux, S., Giner, S. et Giller, K.E. (2015b). PRACT (Prototyping Rotation and Association with Cover crop and no Till) - a tool for designing conservation agriculture systems. *European Journal of Agronomy*, **69**: 21-31.

91. Nhamo, N., Rodenburg, J., Zenna, N., Makombe, G. et Luzi-Kihupi, A. (2014). Narrowing the rice yield gap in East and Southern Africa: Using and adapting existing technologies. *Agricultural Systems*, **131**: 45-55.
92. Nyamangara, J., Masvaya, E.N., Tirivavi, R. et Nyengerai, K. (2013). Effect of hand-hoe based conservation agriculture on soil fertility and maize yield in selected smallholder areas in Zimbabwe. *Soil and Tillage Research*, **126**: 19-25.
93. Nziguheba, G., Zingore, S., Kihara, J., Merckx, R., Njoroge, S., Otinga, A., Vandamme, E. et Vanlauwe, B. (2016). Phosphorus in smallholder farming systems of sub-Saharan Africa: implications for agricultural intensification. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, **104**: 321-340.
94. Olivier, A. (1995) Le *Striga*, mauvaises herbes parasites des céréales africaines: biologie et méthode de lutte. *Agronomie*, **15**: 517-525.
95. Osman, M.A., Raju, P.S. et Peacock, J.M. (1991). The effect of soil temperature, moisture and nitrogen on *Striga asiatica* (L.) Kuntze seed germination, viability and emergence on sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) roots under field conditions. *Plant and Soil*, **131**: 265-273.
96. Oswald, A., Ransom, J.K., Kroschel, J. et Sauerborn, J. (2002). Intercropping controls *Striga* in maize based farming systems. *Crop Protection*, **21**: 367-374.
97. Oswald, A. et Ransom, J. K. (2004). Response of maize varieties to *Striga* infestation. *Crop Protection*, **23**: 89-94.
98. Oswald, A. (2005). *Striga* control-technologies and their dissemination. *Crop Protection*, **24**: 333-342.
99. Pansak, W., Hilger, T.H., Dercon, G., Kongkaew, T. et Cadisch, G. (2008). Changes in the relationship between soil erosion and N loss pathways after establishing soil conservation systems in uplands of Northeast Thailand. *Agriculture Ecosystems and Environment*, **128**: 167-176.
100. Parker, C. (1965). The *Striga* problem-a review. *International Journal of Pest Management*, **11**: 99-109.
101. Parker, C. (1983a). Factor influencing *Striga* seed germination and host-parasite specify. ICRISAT : In the second International Workshop on *Striga*, Ouagadougou (Burkina Faso)
102. Parker C. (1984). The influence of *Striga* species on sorghum under varying nitrogen fertilization. In the Third international Symposium on Parasitic Weeds. Alep, (Syria). 265p
103. Parker, C. (1991). Protection of crops against parasitic weeds. *Crop Protection*, **10**: 6-22.
104. Parker, C. (2009). Observations on the current status of Orobanche and *Striga* problems worldwide. *Pest Management Science*, **65**: 453-459.

105. Penot, E., Domas, R., Andriamalala, H., Hyac, P., Dupin, B., Durand, C., Nave, S., Rabenandro, T. H., Rasolomanjaka, J., Tokarski, Y., Rakotofiringa, A., Bodoy, A., Ahmim R.A., Raharison, T., Rakoto, H. A., et Razafimandimby, S. (2011). Rôle et place du riz pluvial dans les exploitations agricoles à Madagascar : Le cas du lac Alaotra et du Vakinankaratra. *Académie d'Agriculture*, Antananarivo, Madagascar. 31 p.
106. Perez-Vitoria, S. et Sevilla Guzman, E. (2008). Petit précis d'agroécologie : In le colloque International d'Agroécologie *Nourriture, Autonomie, Paysannerie-La ligne d'horizon*. Paris, (France)
107. Ponge, J-F., Vannier G., Arpin, P. et David, J-F. (1986). Caractérisation des humus et des litières par la faune du sol : intérêt sylvicole. *Revue Forestière Française*, **38**: 509-516.
108. Press M.C. et Walting J.R. (2001). Impact of infection by parasitic angiosperm on host photosynthesis. *Plant biology*, **3**: 244-250.
109. Prihar, S.S., Singh, N.T. et Sandhu, B.S. (1977). Response of crops to soil temperature changes induced by mulching and irrigation. *Soil physical proprieties and Crop production in the Tropics*, (édité par Lal, R. et Greenland), John Wiley, New York. 306-316
110. Pullaro, T.C., Marino, P.C., Jackson, D.M., Harrison, H.F. et Keinath, A.P. (2006). Effects of killed cover crop mulch on weeds, weed seeds, and herbivores. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **115**: 97–104.
111. Queinnec, M. (2013). Caractérisation et typologie des exploitations agricoles du Moyen Ouest du Vakinankaratra. *Mémoire d'Ingéniorat*, Sup Agro Montpellier. 43p.
112. Raboin, L.M., Razafimahafaly, A.H.D., Rabenjarisoa, M.B., Rabary, B., Dusserre, J. et Becquer, T. (2016). Improving the fertility of tropical acid soils: Liming versus biochar application? A long term comparison in the highlands of Madagascar. *Field Crops Research*, **199**: 99-108.
113. Ramson J., Kanampiu, F., Gressel, J., De Groote, Burnet, M. et Odhiambo, G. (2012). Herbicide applied to imidazolinone resistant-maize seed as a *Striga* control option for small-scale African farmers. *Weed Science*, **60**: 283-289.
114. Ranaivoson, L., Naudin, K., Ripoche, A., Affholder, F., Rabeharisoa, L. et Corbeels, M. (2017). Agro-ecological functions of crop residues under conservation agriculture. A review. *Agriculture sustainable development*, **26**: 1-17.
115. Randrianjafizanaka, M.T., Autfray, P., Ratsimiala Ramonta, I., Andrianaivo A.P. et Rodenburg, J. (2018). Combined effects of cover crops, mulch, zero-tillage and resistant varieties on *Striga asiatica* (L.) Kuntze in rice-maize rotation systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **256**: 23-33.
116. Ransom, J.K., Eplee, R.E. et Langston, M.A. (1990). Genetic variability for resistance to *Striga asiatica* in maize. *Cereal Research Communications*, **18**: 329-334

117. Ransom, J.K. et Njoroge, J. (1991). Seasonal variation ethylene-induced germination of *Striga hermonthica* in Western Kenya. In *the fifth International Symposium of parasitic Weeds*. Nairobi, Mozambique.
118. Ransom, J.K. (2000). Long-term approaches for the control of *Striga* in cereals: field management options. *Crop Protection*, **19**: 759–763.
119. Ratnadass, A., Randriamanantsoa, R., Rajaonera, T.E., Rabearisoa, M.Y., Rafamantanantsoa, E., Moussa, N. et Michellon, R. (2013). Interaction between cropping systems and white grub (Coleoptera: scarabeoidea) status (pest or beneficial) on upland rice. *Cahier d'Agriculture*, **22**: 432–441.
120. Raunet, M. (2008). Initiation à lecture des paysages morpho-pédologiques de Madagascar. *BVPI/SEHP*, Madagascar, 58p.
121. Raynal-Roques, A. et Sallé, G. (1987). *Striga* Lour. (Scrophulariaceae), essai étymologique. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, **34**: 47-49.
122. Raynal-Roques A. (1991). Diversification in the genus *Striga*. In *the fifth International Symposium of parasitic Weeds*. Nairobi, Mozambique.
123. Raynal-Roques, A. (1994). Répartition géographique et spéciation dans le genre *Striga* (SCROPHULARIACEAE parasites). *Mémoire Sociale et Biogéographie*, **4**: 83-84.
124. Région Vakinankaratra (2011). Monographie du District de Mandoto 2011. Rapport d'activité. 16 p
125. Rodenburg, J., Stein, A., Noordwijk, M. et Ketterings, Q.M. (2003). Spatial variability of soil pH and phosphorus in relation to soil run-off following slash-and-burn land clearing in Sumatra, Indonesia. *Soil and Tillage Research*, **71**: 1-14.
126. Rodenburg, J. (2005). The role of sorghum genotype in the interaction with the parasitic weed *Striga hermonthica*. Thèse de doctorat, *Wageningen University*, 138p.
127. Rodenburg, J., Bastiaans, L. et Kropff, M.J. (2006). Characterization of host tolerance to *Striga hermonthica*. *Euphytica*, **147**: 353–365.
128. Rodenburg, J., Riches, C.R. et Kayeke, J.M. (2010). Addressing current and future problems of parasitic weeds in rice. *Crop Protection*, **29**: 210-221.
129. Rodenburg, J., Michellon, R., Andrianaiivo, A-P., Randrianjafizanaka, M.T., Rakotoarivelo, N.M.N. et Autfray, P. (2014). Management of *Striga asiatica* in the vulnerable upland of central Madagascar: Combining zero-tillage Rice-Maize cover crop rotations with resistant varieties. In *the first conference Agroecology for Africa*. Antananarivo, Madagascar.
130. Rodenburg, J., Cissoko, M., Kayeke, J., Dieng, I., Khan, Z.R., Midega, C.A.O., Onyuka, E.A. et Scholes, J.D. (2015). Do NERICA rice cultivars express resistance to *Striga hermonthica* (Del.) Benth. and *Striga asiatica* (L.) Kuntze under field conditions ?. *Field Crops Research*, **170**: 83-94.

131. Rodenburg, J., Demont, M., Zwart, S.J. et Bastiaans, L. (2016). Parasitic weed incidence and related economic losses in rice in Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **235**: 306–317.
132. Rodenburg, J., Cissoko, M., Kayongo, N., Dieng, I., Bisikwa, J., Irakiza, R., Masoka, I., Midega, C.A.O. et Scholes, J.D. (2017). Genetic variation and host–parasite specificity of *Striga* resistance and tolerance in rice: the need for predictive breeding. *New Phytologist*, **214**: 1267-1280.
133. Roose, E. et Barthes, B. (2001). Organic matter management for soil conservation and productivity restoration in Africa: a contribution from Francophone research. *Nutrient. Cycling in Agroecosystem*, **61**: 159-170.
134. Rotaru, V. et Sinclair, T.R. (2009). Interactive influence of phosphorus and iron on nitrogen fixation by soybean. *Environmental and Experimental Botany*, **66**: 94–99.
135. Rusinamhodzi, L., Corbeels, M., van Wijk, M.T., Rufino, M.C., Nyamangara, J. et Giller, K.E. (2011). A meta-analysis of long-term effects of conservation agriculture on maize grain yield under rain-fed conditions. *Agronomy for Sustainable Development*, **31**: 657-673.
136. Rusinamhodzi, L., Corbeels, M., Nyamangara, J. et Giller, K.E. (2012). Maize-grain legume intercropping is an attractive option for ecological intensification that reduces climatic risk for smallholder farmers in central Mozambique. *Field Crops Research*, **136**: 12-22.
137. Sahrawat, K.L., Jones, M.P., Diatta, S. et Adam, A. (2001). Response of upland rice to fertilizer phosphorus and its residual value in an ultisol. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **32**: 2457-2468.
138. Saito, K., Lindquist, B., Keobualapha, B., Phanthaboon, K., Shiraiwa, T. et Horie, T. (2006). *Stylosanthes guianensis* as a short-term fallow crop for improving upland rice productivity in northern Laos. *Field Crops Research*, **96**: 438-447.
139. Saito, K. et Futakuchi, K. (2009). Performance of diverse upland rice cultivars in low and high soil fertility conditions in West Africa. *Field Crops Research*, **111**: 243-250.
140. Saito, K., Azoma, A.K. et Oikeh, S.O. (2010). Combined effects of *Stylosanthes guianensis* fallow and tillage management on upland rice yield: weeds and soils in southern Benin. *Soil and Tillage Research*, **107**: 57–63.
141. Sallé, G., et Aber, M. (1986). Les Phanérogames parasites: biologie et stratégies de lutte. *Bulletin de la Société Botanique de France*, **133**: 235-263.
142. Sallé, G. et Raynal-Roques, A. (1989). Le *Striga*. *La recherche*, **206**: 44-52.
143. Sauerborn, J. (1991). Parasitic flowering plants, ecology and management. *Verlag Josef Margraf*, Weikersheim, Germany. 127 p.
144. Sauerborn, J., Muller-Stover, D. et Hershenhorn, J. (2007). The role of biological control in managing parasitic weeds. *Crop Protection*, **26**: 246-254.

145. Schaller, N. (2013). L'agroécologie : des définitions variées, des principes communs. *Centre d'études et de prospectives*, 59 p.
146. Scholes, J.D. et Press, M.C. (2008). *Striga* infestation of cereal crops – an unsolved problem in resource limited agriculture. *Current Opinion in Plant Biology*, **11**: 180-186.
147. Schuller, P., Walling, D.E., Sepulveda, A., Castillo, A. et Pino, I. (2007). Changes in soil erosion associated with the shift from conventional tillage to a no-tillage system, documented using (CS)-C-137 measurements. *Soil and Tillage Research*, **94**: 183-192.
148. Schulz, S., Hussaini, M.A., Kling, J.G., Berner, D.K. et Ikie, F.O. (2003). Evaluation of integrated *Striga hermonthica* control technologies under farmer management. *Experimental Agriculture*, **39**: 99–108.
149. Schut, M., Rodenburg, J., Klerkx, L., Hinnou, L.C., Kayeke, J. et Bastiaans, L. (2015). Participatory appraisal of institutional and political constraints and opportunities for innovation to address parasitic weeds in rice. *Crop Protection*, **74**: 158–170.
150. Scopel, E., Fernando A., da Silva, Corbeel, M., Affholder, F. et Maraux, F. (2004). Modelling crop residue mulching effects on water uses and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions. *Agronomy EDP Sciences*, **24**: 383-395.
151. Scopel, E., Triomphe, B., Affholder, F., Da Silva, F.A.M., Corbeels, M., Xavier, J.H.V., Lahmar, R., Recous, S., Bernoux, M., Blanchart, E., Mendes, I.D. et De Tourdonnet, S. (2013). Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, **33**: 113-130.
152. SDmad, GSDM et Ministère de l'agriculture de l'élevage et de la pêche(2007). Rapport final : Mise en place de collection généalogique et de collections testées. Projet d'appui à la diffusion des techniques agro-écologiques à Madagascar. 113 p.
153. Sebillotte, M. (1990). Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. *Les systèmes de culture-INRA*, Paris. 165-196.
154. Seck, P.A., Diagne, A., Mohanty, S. et Wopereis, M.C.S. (2012). Crops that feed the world 7: Rice. *Food Security*, **4**: 7-24.
155. Sester, M., Raveloson, H., Tharreau, D. et Dusserre, J. (2014). Conservation agriculture cropping system to limit blast disease in upland rainfed rice. *Plant Pathology*, **63**: 373–381.
156. Sester, M., Craheix, D., Daudin, G., Sirdey, N., Scopel, E. et Angevin, F. (2015). Assessment of the sustainability of conservation agriculture cropping systems in Madagascar (Alaotra Lake) using MASC-Mada. *Cahier d'Agriculture*, **24**: 123–133.

157. Shiferaw, B., Prasanna, B.M., Hellin, J. et Banziger, M., (2011). Crops that feed the world 6: Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security. *Food Security*, **3**: 307–327.
158. Six, L., Smolders, E. et Merckx, R. (2013). The performance of DGT versus conventional soil phosphorus tests in tropical soils-maize and rice responses to P application. *Plant and Soil*, **366**: 49-66.
159. Smaling, E.M.A., Fresco, L.O. et deJager, A. (1996). Classifying, monitoring and improving soil nutrient stocks and flows in African agriculture. *Ambio*, **25**: 492–496.
160. Snapp, S.S., Mafongoya, P.L. et Waddington, S. (1998). Organic matter technologies for integrated nutrient management in smallholder cropping systems of southern Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **71**: 185-200.
161. Sokal, R.R. et Rohlf, F.J. (1995). Biometry: the principles and practice of statistics in biological research. *W.H. Freeman*, New York. 909 p.
162. Sorèze, J. (2010). Evaluation de l'impact des systèmes de semis direct sous couverture végétal (SCV) à l'échelle de l'exploitation agricole dans le Moyen Ouest du Vakinankaratra, Madagascar. *Mémoire d'Ingénieur*, Sup Agro Montpellier. 79 p.
163. Sourisseau, J-M., Rasolofo, P., Bélières, J-F., Guengant, J-P., Ramanitriniony, H. K., Bourgeois, R., Razafimiarantsoa, T.T., Andrianantoandro, V.T., Ramarijaono, M. et Burnod, P. (2016). Diagnostic Territorial de la Région du Vakinankaratra à Madagascar : Prospective territoriale sur les dynamiques démographiques et le développement rural en Afrique subsaharienne et à Madagascar. *AFD*, Madagascar. 157 p.
164. Tanaka, A., Johnson, J.-M., Senthilkumar, K., Akakpo, C., Segda, Z., Yameogo, L.P., Bassoro, I., Lamare, D.M., Allarangaye, M.D., Gbakatchetche, H., Bayuh, B.A., Jaiteh, F., Bam, R.K., Dogbe, W., Sékou, K., Rabeson, R., Rakotoarisoa, N.M., Kamissoko, N., Mossi, I.M., Bakare, O.S., Mabone, F.L., Gasore, E.R., Baggie, I., Kajiru, G.J., Mghase, J., Ablede, K.A., Nanfumba, D. et Saito, K. (2017). On-farm rice yield and its association with biophysical factors in sub-Saharan Africa. *European Journal of Agronomy*, **85**: 1-11.
165. TerAvest, D., Carpenter-Boggs, L., Thierfelder, C. et Reganold, J.P. (2015). Crop production and soil water management in conservation agriculture, no-till, and conventional tillage systems in Malawi. *Agronomy, Ecosystems and Environment*, **212**: 285-296.
166. Tesso, T.T. et Ejeta, G. (2011). Integrating multiple control options enhances *Striga* management and sorghum yield on heavily infested soils. *Agronomy Journal*, **103**: 1464–1471.
167. Thalouarn, P. et Fer, A. (1993). Le *Striga*, un ravageur de culture vivrière : le point sur les connaissances récentes et sur les méthodes de lutte. *Cahiers d'Agriculture*, **2**: 167-182

168. Thierfelder, C. et Wall, P.C. (2009). Effects of conservation agriculture techniques on infiltration and soil water content in Zambia and Zimbabwe. *Soil and Tillage Research*, **105**: 217–227.
169. Thierfelder, C. et Wall, P.C. (2012). Effects of conservation agriculture on soil quality and productivity in contrasting agro-ecological environments of Zimbabwe. *Soil Use and Management*, **28**: 209–220.
170. Unger, P.W. et Merle, F.V. (1998). Cover crop effects on soil water relationships. *Journal of soil conservation*, **53**: 200-207.
171. Ussiri, D.A., Mnkeni, P.N.S., MacKenzie, A.F. et Semoka, J.M.R. (1998). Soil test calibration studies for formulation of phosphorus fertilizer recommendations for maize in Morogoro district, Tanzania. I. Evaluation of soil test methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **29**: 2801-2813.
172. van Ast, A., Bastiaans, L. et Katile, S. (2005). Cultural control measures to diminish sorghum yield loss and parasite success under *Striga hermonthica* infestation. *Crop Protection*, **24**: 1023-1034.
173. van Ast, A. et Bastiaans, L. (2006). The role of infection time in the differential response of sorghum cultivars to *Striga hermonthica* infection. *Weed Research*, **46**: 264–274.
174. van Delft, G-J., Graves, J.D., Fitt, A.H. et Pruiksma, M.A. (1997). Spatial distribution and population dynamics of *Striga hermonthica* seeds in naturally infested farm soil. *Plant and Soil*, **195**: 1-15.
175. van Heemst, H.D.J. (1985). The influence of weed competition on crop yield. *Agricultural System*, **18**: 81-93.
176. van Ittersum, M.K., van Bussel, L.G.J., Wolf, J., Grassini, P., van Wart, J., Guilpart, N., Claessens, L., de Groot, H., Wiebe, K., Mason-D'Croz, D., Yang, H.S., Boogaard, H., van Oort, P.A.J., van Loon, M.P., Saito, K., Adimo, O., Adjei-Nsiah, S., Agali, A., Bala, A., Chikowo, R., Kaizzi, K., Kouressy, M., Makoi, J., Ouattara, K., Tesfaye, K. et Cassman, K.G. (2016). Can sub-Saharan Africa feed itself? In *the National Academy of Sciences of the United States of America*, **113**: 14964-14969.
177. van Mourik, T.A., Bianchi, F.J.J.A., van Der Werf, W. et Stomph, T.J. (2008). Long-term management of *Striga hermonthica*: strategy evaluation with a spatio-temporal population model. *Weed Research*, **48**: 329-339.
178. Vanlauwe, B. et Giller, K.E. (2006). Popular myths around soil fertility management in sub-Saharan Africa. *Agronomy, Ecosystems and Environment*, **116**: 34-46.
179. Vanlauwe, B., Wendt, J., Giller, K.E., Corbeels, M., Gerard, B. et Nolte, C. (2014). A fourth principle is required to define Conservation Agriculture in sub-Saharan Africa: The appropriate use of fertilizer to enhance crop productivity. *Field Crops Research*, **155**: 10-13.
180. Vogel, H. (1994). Weeds in single-crop conservation farming in Zimbabwe. *Soil and Tillage Research*, **31**: 169-185.

181. Vogt (1983). Entwicklung der Wirt/Parasit-Beziehung *Sorghum bicolor/Striga hermonthica* unter dem Einfluss verschieden er Stickstoffformen und Standortfaktoren. *Institut für Pflanzenproduktion in den Tropen und Subtropen*, Universität Hohenheim, Stuttgart, RFA, 166 p.
182. Westerman, P.R., van Ast, A., Stomph, T.J. et van Der Werf, W. (2007). Long-term management of the parasitic weed *Striga hermonthica*: strategy evaluation with a population model. *Crop Protection*, **26**: 219–227.
183. Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D. et David, C. (2009). Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for sustainable development*, **29**: 503–515.
184. Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J-F., Ferrer, A. et Peigné, J. (2013). Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for sustainable development*, **34**: 1–20.
185. Wopereis, M.C.S., Diagne, A., Rodenburg, J., Sie, M. et Somado, E.A. (2008). Why NERICA is a successful innovation for African farmers: A response to Orr et al from the Africa Rice Center. *Outlook on Agriculture*, **37**: 169–176.
186. Yoder, J.I. et Scholes, J.D. (2010). Host plant resistance to parasitic weeds; recent progress and bottlenecks. *Current Opinion in Plant Biology*, **13**: 478–484.
187. Yoneyama, K., Yoneyama, K., Takeuchi, Y. et Sekimoto, H. (2007a). Phosphorus deficiency in red clover promotes exudation of orobanchol, the signal for mycorrhizal symbionts and germination stimulant for root parasites. *Planta*, **225**: 1031–1038.
188. Yoneyama, K., Awad, A. A., Xie, X., Yoneyama, K. et Takeuchi, Y. (2010). Strigolactones as germination stimulants for root parasitic plants. *Plant Cell Physiology*, **51**: 1095–1103.
189. Yoneyama, K., Ruyter-Spira, C. et Bouwmeester, H. (2013). Induction of Germination. Parasitic Orobanchaceae. *Springer-Verlag*, Berlin. 518 p.
190. Yoneyama, K., Xie, X.N., Kisugi, T., Nomura, T. et Yoneyama, K. (2013). Nitrogen and phosphorus fertilization negatively affects strigolactone production and exudation in sorghum. *Planta*, **238**: 885–894.

Webographie :

- http 1 : Banque Mondiale (2015). Available online
<https://donnees.banquemondiale.org/indicateur.Education/santé>.
- http 2 : BNGRC (2017). Cadre intégré de classification de la sécurité alimentaire. Available online : <https://www.bngrc-mid.mg>
- http 3 : Conservation international Madagascar, (2017). Sécurité alimentaire. Available online
<https://conservation.org>
- http 4 : Ejeta, G. (2007). The *Striga* scourge in Africa : A growing pandemic. The world scientific connecting greats minds. Available online
https://doi.org/10.1142/9789812771506_0001
- http 5 : FAO/PAM (2013). Mission FAO/PAM d'évaluation de la sécurité alimentaire à Madagascar. FAO/PAM. Rome75p. Available online <http://www.fao.org/3/a-aq115f.pdf>
- http 6 : Hoffman, G., Diarra, C. et Dembele, D. (1994). Outbreaks and new records: *Striga asiatica*, new pest of maize in Mali. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), *Plant Protection Bulletin*. Available online <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00549167>
- http 7 : IDAO.CIRAD (2016). *Striga asiatica* (L.) Kuntze - Scrophulariaceae – Dicotylédone. Available online
http://idao.cirad.fr/SpecieSheet?sheet=adventoi/especes/s/strlu/strlu_fr.html
- http 8 : Pound, J., Castaldi, L., Rakotonirainy, M., et Rambalo, H. (2017). Mission FAO/PAM d'évaluation des récoltes et de la sécurité alimentaire à Madagascar. Rapport Spécial. Available online <http://www.fao.org/giews/> et
<http://www.wfp.org/food-security/reports/CFSAM>
- http 9 : Press M.C. et Walting J.R. (2001). Impact of infection by parasitic angiosperm on host photosynthesis. *Plant biology*. Available online <https://doi.org/10.1055/s2001-15195>.
- http 10 : Rasambainarivo, J.H.et Ranaiarivelo, N. (2003). Profil fourrager Madagascar. FAO, 24 p. Available online <http://www.fao.org>
- http 11 : Rey, J-B. (2013). L'agorecologie. Available online
<http://www.agroecologie.fr/agroecologie-definition.html>
- http 12 : worldbank (2009). Madagascar-Note sur la politique rizicole. Available online
<http://www.siteresources.world.org>

Annexes

Annexe 1 : Test de germination à l’Africa Rice (Tanzanie)

1. Dispositif expérimental et inoculation

2 solutions tests \times 6 périodes \times 9 traitements \times 3 répétitions \times 3 sous échantillons.

2. Le test de germination

Tableau 1 : Représentation des périodes des prélèvements des solutions d’exsudats racinaires (ER) et de la date du test de germination.

Test	Date du test de germination	Date de prélèvement des ER
1	03/05/2016	02/05/2016
2	04/05/2016	27/04/2016
3	05/05/2016	25/04/2016
4	09/05/2016	09/05/2016
5	26/05/2016	12/05/2016
6	30/05/2016	16/05/2016

3. Résultats :

a. Test de la germination des graines de *Striga asiatica* en boîte de Pétri

Tableau 2 : Analyse de la variance du taux de germination des graines du *Striga asiatica* en fonction des solutions tests (*Mucuna*, Niébé, Haricot-riz, *Stylosanthes*, Maïs, NERICA-4, NERICA-9 et B22), des périodes de leurs extractions (T1, T2, T3, T4, T5 et T6) et de leur interaction.

Source	ddl	F	$P > F$
Solutions tests (ST)	7	4,13	0,0115
Répétitions	2	0,86	0,4458
Période (P)	5	35,90	< 0,0001
ST \times P	35	4,97	< 0,0001

Tableau 3 : Taux de germination moyenne des graines de *Striga asiatica* dans les boîtes de Pétri en présence de l'eau et des solutions tests d'exsudats racinaires prélevées à différente période.

Types d'exsudats racinaires	52 JAS- T3		54 JAS-T2		60 JAS-T1		66 JAS-T4		69 JAS-T5		73 JAS-T6		Moyenne		ETM
<i>Mucuna</i>	0,182	cdef	0,005	k	0,142	defgh	0,060	ghijk	0,128	defghi	0,100	efghijk	0,103	ABCD	±0,02
Niébé	0,026	ijk	0,000	k	0,023	ijk	0,491	a	0,006	k	0,020	ijk	0,094	BCD	±0,04
Haricot-riz	0,047	ghijk	0,000	k	0,010	jk	0,078	fghijk	0,121	defghij	0,080	fghijk	0,056	D	±0,01
<i>Stylosanthes</i>	0,081	fghijk	0,016	ijk	0,045	ghijk	0,519	a	0,101	efghijk	0,078	fghijk	0,140	AB	±0,04
Maïs	0,085	fghijk	0,063	ghijk	0,072	fghijk	0,338	b	0,073	fghijk	0,236	bcd	0,144	A	±0,03
NERICA-4	0,203	cde	0,003	k	0,009	jk	0,232	bcd	0,143	defg	0,111	efghijk	0,117	ABC	±0,03
NERICA-9	0,027	hijk	0,022	ijk	0,026	ijk	0,288	bc	0,045	ghijk	0,094	efghijk	0,083	D	±0,02
B22	0,202	cde	0,015	ijk	0,030	ghijk	0,101	efghijk	0,038	ghijk	0,028	hijk	0,069	D	±0,02
Moyenne	0,1067	B	0,0155	D	0,0444	CD	0,2634	A	0,0819	BC	0,0932	B			

b. Test de levée en serre sur des cultures en pot expérimental de *Striga asiatica*

Tableau 4 : Analyse de la variance de *Striga asiatica* émergés en fonction de la variété du riz (V) et de solutions tests (ST) ainsi que du milieu expérimental

Source	ddl	F	P> F
Site (S)	1	631,3610	< 0,0001
Variétés (V)	1	2,09	0,29
Solutions test (ST)	8	1,01	0,44
Répétition (R)	2	3,45	0,22
S × V	1	1,13	0,29
S × ST	8	0,82	0,59
V × ST	8	0,64	0,74
S × V × ST	8	1,05	0,41

Tableau 5 : Quantité moyenne de *Striga asiatica* émergés par pot de culture, dans les deux tests, mesurée à Dare es Salam et à Antsirabe

Solutions tests	Dare es salam-variétés				Antsirabe- variétés					
	B22	WAB56-104	Moyenne	ETM	B22	NERICA-16	Moyenne	ETM	Moyenne	ETM
Témoin	25,2	36,1	30,2	±7,5	1,00	1,29	1,14	±0,4	7,2	±6,3
<i>Mucuna</i>	34,4	25,7	29,7	±3,5	0,26	0,26	0,26	±0,2	5,2	±4,8
Niébé	34,1	18,4	25,1	±3,9	1,47	0,82	1,12	±0,6	6,4	±4,4
Haricot-riz	11,7	25,1	17,3	±5,7	0,26	0,00	0,12	±0,2	3,5	±4,3
<i>Stylosanthes</i>	32,6	24,7	28,4	±5,5	0,26	0,26	0,26	±0,2	5,1	±5,3
Maïs	37,8	16,5	25,1	±6,2	0,44	0,82	0,62	±0,4	5,5	±5,4
NERICA-4	27,6	13,0	19,0	±5,9	0,59	2,04	1,20	±0,9	5,6	±4,2
NERICA-9	26,0	30,1	28,0	±3,7	0,82	0,82	0,82	±0,4	6,3	±4,7
B22	34,0	19,0	25,4	±3,4	0,82	0,26	0,51	±0,3	5,3	±4,2
Moyenne	28,0	22,2			0,615	0,635				
Ecartype	2,5	2,1			0,2	0,2				

Tableau 6 : Taux de germination moyenne des graines de *Striga asiatica* dans les boîtes de Pétri en présence du stimulant synthétique GR 24 et des solutions tests d'exsudats racinaires prélevées à différente période.

Types d'Exsudats racinaires	52 JAS- T3		54 JAS-T2		60 JAS-T1		66 JAS-T4		69 JAS-T5		73 JAS-T6		Moyenne	ETM
<i>Mucuna</i>	0,572	rstuv	0,627	mnopqrst	0,703	defghijklm	0,697	efghijklm	0,838	a	0,811	ab	0,708	±0,03
Niébé	0,539	uv	0,691	fghijklmn	0,612	nopqrstu	0,610	nopqrstu	0,773	abcdef	0,766	abcdefgh	0,665	±0,02
Haricot-riz	0,591	qrstu	0,678	jklmnop	0,675	jklmnop	0,679	jklmnop	0,781	abcd	0,775	abcde	0,697	±0,02
<i>Stylosanthes</i>	0,532	uv	0,660	klmnopq	0,748	bcdefghij	0,739	bcdefghijk	0,739	bcdefghijk	0,769	acdefg	0,698	±0,02
Maïs	0,550	tuv	0,612	nopqrstu	0,602	pqrstu	0,713	cdefghijkl	0,681	ijklmnop	0,811	ab	0,662	±0,02
NERICA-4	0,502	v	0,641	lmnopqr	0,608	opqrstu	0,633	lmnopqrs	0,762	abcdefghi	0,766	abbcdefgh	0,652	±0,02
NERICA-9	0,558	sstuv	0,684	hijklmnop	0,579	qrstuv	0,635	lmnopqrs	0,782	abcd	0,794	abc	0,672	±0,02
B22	0,549	tuv	0,647	lmnopqr	0,577	rstuv	0,689	ghijklmno	0,756	abcdefghij	0,798	ab	0,669	±0,02
Moyenne	0,549	D	0,655	BC	0,638	C	0,674	B	0,764	A	0,786	A		

Annexe 2 : Effets des exsudats racinaires des plantes sur l'émergence de *Striga asiatica* L. (Kuntze) en milieu contrôlé

Tableau 1 : Analyse de la variance de *Striga asiatica* émergés en fonction de la variété du riz (V) et de solutions tests (ER)

Source	DDL	F	P> F
Exsudats racinaires (ER)	8	1,01	0,44
Variétés (V)	1	2,09	0,29
Répétition (R)	2	3,45	0,22
V x ER	8	0,64	0,74

Tableau 2 : Nombre moyen de *Striga asiatica* émergés par pot de culture

Solutions tests	Variétés de riz			
	B22	NERICA-16	Moyenne	ETM
Témoin-eau	1,00	1,29	1,14	±0,4
<i>Mucuna</i>	0,26	0,26	0,26	±0,2
Niébé	1,47	0,82	1,12	±0,6
Haricot-riz	0,26	0,00	0,12	±0,2
<i>Stylosanthes</i>	0,26	0,26	0,26	±0,2
Maïs	0,44	0,82	0,62	±0,4
NERICA-4	0,59	2,04	1,20	±0,9
NERICA-9	0,82	0,82	0,82	±0,4
B22	0,82	0,26	0,51	±0,3
Moyenne	0,615	0,635		
Ecartype	0,2	0,2		

Annexe 3 : Fiche variétale du B22, NERICA-9 et NERICA-4 B22 (SDmad, 2007)

1. IDENTIFICATION

- 1.1 Synonyme :
- 1.2 Espèce :
- 1.3 Type variétal : B®
- 1.4 Parents :
- 1.5 Nature génétique :
- 1.6 Origine géographique : Brésil
- 1.7 Développement : 1980



2. CARACTERISTIQUES AGRONOMIQUES

- 2.1 Ecologie: riz pluvial
- 2.2 Nombre de jours à 50% de recouvrement :
- 2.3 Maturité : 115 jours
- 2.4 Rendement potentiel: 5000 kg/ha
- 2.5 Poids de 1000 grains : 43 g
- 2.6 Résistance à la pyriculariose : Faible
- 2.7 Résistance aux insectes: Bonne
- 2.8 Résistance à la verse : Faible

3. CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES

3.1 Plante

- Hauteur moyenne: <100 cm
- Tallage : Bon
- Couleur de la gaine de la base : Vert clair
- Angle de la feuille : Érigé
- Angle du drapeau de la feuille : Érigé

3.2 Panicule

- Type : Retombante
- Exsertion : Bonne

3.3 Graines

- Longueur : 10, 03 mm
- Largeur : 3,32 mm
- Taille moyenne : 105 cm

Couleur du lemme : Jaune clair

Auvent :

Couleur de l'apex :

Couleur des caryopses : Blanc

4. CARACTERISTIQUES ORGANOLEPTIQUES ET TECHNOLOGIQUES

4.1 Taux de broyage : %

4.2 Qualité de cuisson : Bonne

4.3 Arôme : Aucune

NERICA-9 (Africa Rice Center, 2008)

1. IDENTIFICATION

1.1 Synonyme : WAB 450 - B - 136 - HB

1.2 Espèce : *Oryza sativa* × *Oryza glaberrima*

1.3 Type variétal : NERICA®

1.4 Parents : WAB 56 - 104 / CG 14

1.5 Nature génétique : lignée pure

1.6 Origine géographique : ADRAO, Bouaké

1.7 Développement : 1994



2. CARACTERISTIQUES AGRONOMIQUES

2.1 Ecologie: riz pluvial

2.2 Nombre de jours à 50% de recouvrement : 55 – 60 jours

2.3 Maturité : 75 – 85 jours

2.4 Rendement potentiel: 5000 kg/ha

2.5 Poids de 1000 grains : 29.4 g

2.6 Résistance à la pyriculariose : Bonne

2.7 Résistance aux insectes: Bonne

2.8 Résistance à la verse : Modérée

3. CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES

3.1 Plante

Hauteur moyenne: 105 cm

Tallage : Bon

Couleur de la gaine de la base : Vert clair

Angle de la feuille : Érigé

Angle du drapeau de la feuille : Érigé

3.2 Panicule

Type : Compact

Exsertion : Bonne

3.3 Graines

Longueur : 6,8 mm

Largeur : 2,3 mm

Taille moyenne : 105 cm

Couleur du lemme : Fauve

Auvent : Absent

Couleur de l'apex : Brun clair

Couleur des caryopses : Blanc

4. CARACTERISTIQUES ORGANOLEPTIQUES ET TECHNOLOGIQUES

4.1 Taux de broyage : 62%

4.2 Qualité de cuisson : Bonne

4.3 Arôme : Rien que l'odeur au stade de la floraison

NERICA-4(Africa Rice Center, 2008)

1. IDENTIFICATION

1.1 Synonyme: WAB 450-I-B-P-91-HB

1.2 Espèces : *Oryza sativa* × *Oryza glaberrima*

1.3 Type variétal : NERICA®

1.4 Parents : WAB 56 – 104 / CG 14



2. CARACTERISTIQUES AGRONOMIQUES

2.1 Ecologie : riz pluvial

2.2. Nombre de jour à 50% de recouvrement : 55 – 60 jours

2.3. Maturité : 70-75 jours

2.4 Rendement potentiel : 5000 kg/ha

2.5 Poids de 1000 grains : 29.0 g

2.6 Résistance à la pyriculariose des feuilles : Moyenne

2.7 Résistance aux insectes : Bonne

2.8 Résistance à la verse : Bonne

3. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES

3.1 Plante

Hauteur moyenne : 120 cm

Tallage : Bon

Couleur de la gaine de la base : Vert clair

Angle de la feuille : Érigé

Angle du drapeau de la feuille : Ériger

3.2 Panicules

Type : Compact

Exsertion : Bonne

3.3 Graines

Longueur : 7,2 mm

Largeur : 2,5 mm

Taille : Long

Couleur du lemme : Fauve

Auvent : Absent

Couleur de l'apex : Aucune

Couleur des Caryopses : Blanc

4. CARACTERISTIQUES ORGANOLEPTIQUES ET TECHNOLOGIQUES

4.1 Teneur en amylose : 23%

4.2 Taux de broyage : 63%

4.3 Qualités culinaires : Bonnes

4.4 Arôme : Aucun

Annexe 4 : Biological control of *Striga asiatica* (Scrophulariaceae) in organic rainfed rice cultivation.

ORGANIC RICE FARMING and PRODUCTION SYSTEMS – II (ORP II)

International conference

1 – 4 September 2015

**UNIVERSITA DEGLI STUDI DI MILANO
MILAN ITALIE**

BIOLOGICAL CONTROL OF *Striga asiatica* (Scrophulariaceae) IN ORGANIC RAINFED RICE CULTIVATION.

RAVAOMANARIVO RAVELOSON L H¹, RAKOTONDRAZAFY H¹, RANDRIANJAFIZANAKA M T²,
MOUSSA N³, MICHELON R³ & AUTFRAY P³

ABSTRACT

*Rainfed rice cropping is under various pest pressures namely the weed *Striga asiatica*. Different biological methods can be combined to control this weed, especially in organic rice cropping. The aim of this research study is to assess how these methods impact *Striga* infestation on rice plants. Research experiments*

*were conducted in the mid-western region of Madagascar in Ivory Ankazomiriotra on the collective field devices DP / SPAD. The observations were performed on twelve plots with different cropping systems. The counting of *Striga* and insects was done on 5m x 4.5m rice plots and 9m x 4.20m corn plots. *Striga* abundance was evaluated by its total number per square meter taking into account the cropping systems and the rice varieties used. Direct and net samplings of insects that are pests to *Striga* have been carried out on a weekly interval. The impacts of those insects on *Striga* were evaluated in experimentation rearing cages, on field and in the laboratory. Assessments were made by counting*

¹Department of Entomology-Faculty of Science-
University of Antananarivo.

²Plant Biology and Ecology –Faculty of Science –
University of Antananarivo.

³CIRAD Antananarivo Madagascar.

the number of leaves or capsules of Striga consumed by each insect during its development. Tillage system is the most infested by Striga with an infestation rate up to 6,05/m². Systems using Arachis and Stylosanthes as cover crops are the least infested by Striga with just 0,47Striga/m². Plot with rice variety Nerica 4 is exempt of Striga infestation. Six species of insects are found on S. asiatica. Adults and larvae Proictes sp and Aphthona sp (Coleoptera) and caterpillars Precis orithya madagascariensis, Spodoptera littoralis and Heliothis armigera attack the leaves of S. asiatica, an individual may consume 26.66 to 8 leaves per day. Caterpillar Platypilia gonodactyla is abundant on all crops but consumes only 0.250 to 0.550 capsule a day per individual. Rice//corn/ Arachis and rice//corn / Stylosanthes systems have a low rate infestation of S. asiatica (0-5%). Rice//corn / Arachis system attracts a large population of beneficial insects while rice//corn / Stylosanthes system has low insect and striga populations. Arachis and Stylosanthes cover crops and the variety NERICA 4 can be recommended in biological control of S. asiatica.

Keywords: Rainfedrice, *Striga asiatica*, biological control, cover crops, rice varieties, insects.

INTRODUCTION

In Madagascar, growing demand for rice and resulting increased pressure on inundated lands has favored the cultivation of upland rain-fed rice on hill slopes. In the Vakinankaratra region, this cropping system is around 7% of the rice area estimated to be about 4 500 hectares. Among the constraints on rainfed crops, and particularly cereals, *Striga* causes high yield losses [1].

Striga asiatica is a parasitic plant that binds on the root system of the rice and other grasses. This causes an inhibition of the growth and awater stress of the host plant which results in harvest losses [1] up to 100% [2].The genus *Striga* includes about forty species. The damage caused by these weeds in the world is estimated at several billion dollars annually [3].In Madagascar, only four species are present namely: *Striga forbesii*, parasite of wild grass [4], *S. gesnerioides* and *S. hermonthica* [2] and *S. asiatica*. This latter was accidentally introduced in Madagascar in the XXth century and is by far the most frequent and the most widespread species. It can cause considerable damage to crops, especially in the Midwest and Southern regions of the Island [5]. *Striga* is suitable to low rainfall areas with pronounced dry season and high annual temperatures. Soils with low organic matters and nitrogen are the most favorable to the development of *Striga*. Small stakeholders that do not practice crop rotation and who provide little or no fertilizers

or manure, have their crops more infested by these weeds [6]-[1].

In organic rice cropping, various methods are applied to control *Striga* such as: crop rotation and association, the supply of nitrogenous or organic manure or resistant varieties of rice. The DMC system (Direct seeding, Mulch-based Cropping) reduces the damages due to *Striga* [1].Several countries like East Africa, Pakistan and India have based their work on biological control using insects as a control agent [3].

This study aims to evaluate the effects of cropping systems and cover crops on the abundance of *Striga*, to compare the level of infestation of different rice varieties by *Striga* and inventory and measure the impacts of insects on this weed.

MATERIALS AND METHODS

The studies were conducted in the Middle West of Madagascar, at Ivory (19 °32'59"S46 °24'59" E). Ivory is characterized by a warm tropical climate with an annual average temperature of 22.9° C and an average annual rainfall of 121 mm.

Observations were performed on the collective field devices DP / SPAD (Dispositif d'Enseignement et de Recherche en Partenariat sur les Systèmes de Production d'Altitude et Durabilité) during three successive years (from 2011 to 2014). Twelve plots with different cropping systems were followed: rice//maize with different cover plants namely *Arachis pintoï*, *Arachis repens*, *Niébé-mucuna*, *haricot-riz* and *Stylosanthes*; as well as plowing systems with different varieties of rice such as B 22, Nerica 4 and Nerica 9. Rice was sown with 3-4 seeds per hole. The distance between two plants was 0.20cm and the distance between two rows 0.30cm. For maize, sowing was 2 seeds per hill. The distance between plants was 50cm and the distance between two lines 50 cm. Abundance of *Striga* was determined by its total number per square meter depending on the type of cropping system and according to the rice varieties.Inventory of insects considered as pests of *Striga* are done weekly by direct capture or using nets. The impacts of those insects to *Striga* were evaluated in experimentation rearing cages, on field and in the laboratory. Assessments were made by counting the number of leaves or capsules of *S. asiatica* consumed by each insect during its development.

RESULTS

The quantity of *Striga* increases with time and varies significantly with the type of culture system and cover crops. All plots in the tilling system are infested by *Striga* with a number reaching a maximum of 6,05/m² and a minimum of

0,17/m². For DMC, the maximum number of *Striga* is 2,26/m² and the minimum 0,04/m². Plots with *Stylosanthes* as cover plant was the least infested with a maximum of 0,47*Striga*/m² and those with cowpea- mucuna are the most infested with a maximum of 2,26/m². (Fig 1)

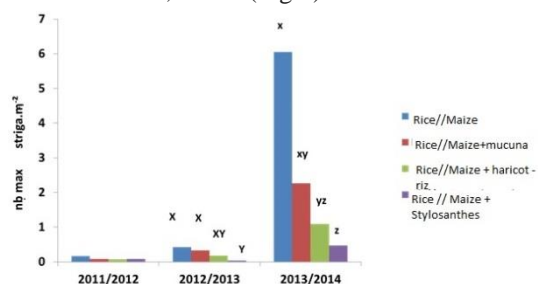


Fig 1. Impact of cropping system on *Striga* infestation to rice during three successive years

Infection rates differ significantly with rice varieties. B22 is the most infested with a maximum of 10,8*Striga*/m², NERICA 4 appeared to be the least infested with a maximum of 0,18 *Striga*/m². (Fig 2)

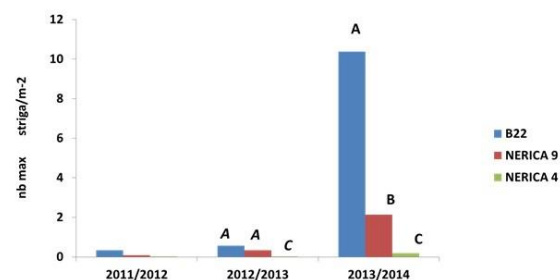


Fig 2. Impact of rice varieties on *Striga* infestation

Insect pests of *S.asiatica* belong to the Order of Lepidoptera and Coleoptera (Table 1).

Table1. Diversity of insect pests of *Striga asiatica*

ORDRE	FAMILLE	SOUS-FAMILLE	GENRE	ESPECE	SOUS-ESPECE
LEPIDOPTERES	NYMPHALIDAE	NYMPHALINAE	<i>Precis (Junonia)</i>	<i>orithya</i>	<i>madagascariensis</i>
	PTEROPHORIDAE	PTEROPHORINAE	<i>Platyptilia</i>	<i>gonodactyla</i>	
	NOCTUIDAE	NOCTUINAE	<i>Helioverpa</i>	<i>armigera</i>	<i>armigera</i>
		AMPHYTRINAE	<i>Spodoptera</i>	<i>littoralis</i>	
COLEOPTERES	CHRY SOMELIDAE	DONACINAE	<i>Aphthona</i>	<i>sp</i>	
	CURCULIONIDAE		<i>Proic</i>	<i>sp</i>	

Diversity and abundance of insects vary according to culture systems (Fig 3). For tillage systems, insect diversity is low and particularly the presence of *Precis (Junonia)* orithya madagascariensis, *Platyptilia gonodactyla* and *Spodoptera littoralis* is noted. These insects are mostly found in the month of March. On DMC

system, only one insect, *Proictes* sp, was found when *Stylosanthes* was used as a cover plant while systems based on *Arachis* showed a wide variety of insects. Almost every pest of *S. asiatica* was found in those plots.

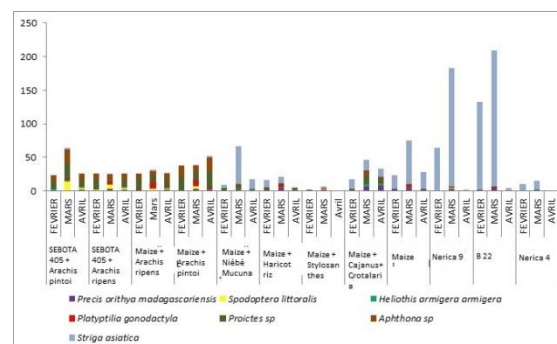


Fig 3. Diversity and abundance of insects according to culture system

There are two categories of insects that feed on *S. asiatica*: those feeding on leaves and those feeding on capsules. Lepidoptera are the main consumers of *S. asiatica* leaves. *S. littoralis* and *P. orithya madagascariensis* have significant impacts on *Striga* (> 240 leaves per individual). *H. armigera* plays minor role although each individual can consume up to 125 leaves during its development. (Table 2). Only one species, *Platyptiliagonodactyla* (Lepidoptera Pterophoridae), feeds on capsules of *Striga*. Its impact on *Striga* is low: an individual can consume only 3 capsules in his lifetime. The adult do not eat *Striga* but feeds on plant nectar.

Table 2. Quantity of *Striga asiatica* leaves consumed by insect species

Species	Stage	Time (day)	Number of <i>Striga</i> leaves consumed per stage	Quantity of leaves consumed per day	Total quantity of leaves consumed
<i>Precis orithya madagascariensis</i>	1 st	4	18	4,7	240,66
	2 nd	5	48	9,6	
	3 rd	4	68	19,33	
	4 th	4	106,66	26,66	
<i>Helicoverpa armigera armigera</i>	1 st	unknown	unknown	unknown	125
	2 nd	2	10	5	
	3 rd	2	15	7,5	
	4 th	2	25	12,5	
	5 th	2	30	15	
	6 th	3	45	20	
<i>Spodoptera littoralis</i>	1 st	2	16	8	288
	2 nd	3	28	9,33	
	3 rd	3	36	12	
	4 th	3	52,5	17,5	
	5 th	3	63,5	21,16	
	6 th	4	92	25,6	
<i>Aphthona sp.</i>		32	0,0625	0,0625	2
<i>Proictes sp.</i>		40	0,125	0,125	5

DISCUSSION

Plot infestations by *Striga* depend on the adopted culture systems. Tillage system is the most infested. According to [1], tillage systems constitute a suitable environment for the development of *Striga* while the DMC permits to control this seed. Indeed, cover plants create unfavorable conditions for the development of *Striga* [1]. The effect of these cover plants is a reduction of the temperature range, particularly a reduction of the maximum temperature of the soil due to the constant maintenance of vegetation cover. This low temperature makes the preconditioning time of *Striga* seeds longer (especially *S. asiatica* of which the optimal temperature for this phase is 30 °C) and may limit the germination (optimum temperature 30 °C) [1].

Service plants exert different effects on *Striga*. *Arachis* and *Stylosanthes* spp have a negative effect on *Striga*. For these plants, an infestation rate of 0.47 / m² was observed in the Middle West of Madagascar. *Arachis* spp and *Stylosanthes* are able to produce a sub shaded biomass (70-80% shading), thus unfavorable for the germination of *Striga* [7]-[8]. Finally, due to their contribution on organic matter, especially nitrogen, leguminous plants allow to control *Striga* [1].

Infestation rate varies depending on the variety. B 22 is the most infested followed by Nerica 9 but Nerica 4 is not infested at all. To germinate, seeds need to have a specific chemical signal from the roots of the host plant. The roots exudates of different varieties of rice certainly differ, making some varieties more attractive to *Striga* compared to others. Studies are under way to assess the determinism of this attractiveness.

The number and diversity of insects vary with culture systems. The diversity and abundance of insects are low for all systems without cover plants. It is found that *Precis orithya* and *Platyptilia gonodactyla* have a specific preference for *S. asiatica*.

For systems with vegetation cover, insect diversity is low when in association with *Stylosanthes* and *Mucuna*/cowpea. These plants provide good ground cover and form an unfavorable micro climate for the development of many insects and also have repellent properties to insects [9]. However, insects are abundant and diverse in plots using *Arachis* spp, *Cajanus*/Slenderleaf and bean-rice as plant covers. According to different authors, *Arachis* and in particular, *A. pintoi* attract insects [7]-[8]. In addition, leguminous plants, by providing nitrogen, contribute to the development of other plants. Cultures with abundant nitrogen rate attract insects [10].

Four species of Lepidoptera *Precis (Junonia)* *orithya* *madagascariensis*, *Helicoverpa armigera* *armigera*, *Spodoptera littoralis* and *Platyptilia gonodactyla* and two species of Coleoptera *Proictes* sp and *Aphthona* sp attack *S. asiatica*. Among Lepidoptera, *P. orithya* is known to be an important pest of *Striga* in Africa, South and South-East Asia, Australia, India [11]-[12]-[13]. In this study, we noticed that these three species of Lepidoptera *S. littoralis*, *P. orithya* *madagascariensis* and *H. armigera* are the main predators of *S. asiatica*. When these Lepidoptera are abundant in a plot, the number of *S. asiatica* decreases. However, *H. armigera* and *S. littoralis* are polyphagous pests and attack many plants of economic importance. Their use as biological control against *Striga* is then limited.

P. gonodactyla attacks capsules and may decrease the number of seeds of *S. asiatica*. Other insects like *Proictes* sp and *Aphthona* sp eat *S. asiatica* leaves but in a small amount. Although these beetles are present in abundance in a plot, the number of *S. asiatica* remains almost unchanged.

Other species of *Striga* pests are known in Africa and Asia. *Ophiomyia Strigalis* (Diptera Agromyzidae) causes galls on stems and caps of several species of *Striga* [13]. *Smicromyx umbrinus* (Coleoptera Chrysomelidae) attacks *Striga* leaves in Africa [13]. The latter species is present in Madagascar [14], but was not found in the Midwest.

CONCLUSION

Plowing rice cultivation systems are the most infested with *Striga*. *Stylosanthes* and *Arachis* spp used as cover crops, significantly reduce infestation of rice by *Striga*. NERICA 4 is the recommended variety in rain-fed areas favorable for the development of *Striga*. Insect pests of *Striga* are mainly Lepidoptera and Coleoptera but the beetles cannot significantly reduce the number of *S. asiatica*. Lepidoptera play an important role and can reduce the infestation of *S. asiatica*. Thus, *Spodoptera littoralis*, *Precis orithya* *madagascariensis* and *Helicoverpa armigera* and *Platyptilia gonodactyla* can contribute to the control of *Striga*.

In perspective, the determinism of the attractiveness of different varieties of rice to *Striga* will be studied and will identify rice varieties resistant to *Striga*.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by the French Agency for Development (AFD) through funding to the Direct-Seeding Group of Madagascar (GSDM).

REFERENCES

- [1] HUSSON O, CHARPENTIER H, RAZANAPARANY C, MOUSSAN, MICHELLON R, NAUDIN K, RAZAFINTSALAMA H, RAKOTOARINIVO C, RAKOTONDRAMANANA & SEGUY L 2008. *Stylosanthes guyaniensis*. Manuel pratique du semis direct à Madagascar. Vol 3 Chap 3 ,1-12
- [2] ANDRIANAIVO A P 1997. Contribution à l'étude physiologique du complexe parasitaire riz pluvial strict. Mémoire de DEA Faculté des Sciences, Option Biologie et Écologie végétale. 56p.
- [3] THALOUARN P & FER A 1993. Le Striga, un ravageur de cultures vivrières : le point sur les connaissances récentes et sur les méthodes de lutte. Cahiers Agricultures. Vol 2 (3) 167-182, Synthèse
- [4] RASOLOFO R et ANDRIANAIVO A P 1989. Mise au point de la biologie des Striga Division de Pathologie Végétale/FOFIFA/Ambatobe, Antananarivo, Madagascar, 21p.
- [5] ANDRIANAIVO A P, KACHELRIESS S, KROSCHER J & ZEHRER W 1998. Biologie et gestion du Striga à Madagascar. FOFIFA, DPV, GTZ, 65 p.
- [6] GEIGER U 1994. Verbreitung und Bedeutung von Striga asiatica (L) Kuntze in Anbausystemen des Mittleren Westens Madagaskars. Diplomarbeit, Institut für Pflanzenproduktion in den Tropen und Subtropen-Universität Hohenheim, RFA, 90 pp.
- [7] HUSSON O, CHARPENTIER H, MICHELLON R, RAZANAMPARANY C, MOUSSA N, ENJALRIC F, NAUDIN K, RAKOTONDRAMANANA & SEGUY L 2012. Arachides pérennes, *Arachis pintoï* et Arachis (Fiches techniques plantes de couverture : Légumineuses pérennes), Manuel pratique du semis direct à Madagascar. Volume III. Chapitre 3. § 2.3.12p.
- [8] DEMBELE B & AMADOU S 2009. Guide de formation participative contre le Striga dans le Système de culture à base de Sorgho-27p.
- [9] RAFARASOA L S 2011. Private communication.
- [10] KERRIDGE P C & HARDY B 1994. Biology and agronomy of forage *Arachis*. CIAT N° 240. Cali. Colombia. 209 p. ISBN: 958-9183-96-4.
- [11] DELPHINE G, LAVASTRE, GUINETI & NATHALIE le G 2010. Inventer une nouvelle agriculture. La recherche agronomique pour le développement, Département Bios, 48p.
- [12] BINGHAM C T 1905. Faune de l'Inde britannique. Papillons. Vol 1.
- [13] WILLIAMS M 1994. Papillons de l'Afrique australe. A Field Guide. ISBN 1-86812-516-5.
- [14] THIERNON S L 1999. Les faux hôtes, une alternative de lutte contre *Striga gesnerioides* (Willd.) Vatke et *S. hermonthica* (Del.) Benth. 61p.)
infested. According to [1], tillage systems constitute a suitable environment for the development of *Striga* while the DMC permits to control this seed. Indeed, cover plants create unfavorable conditions for the development of *Striga* [1].

The effect of these cover plants is a reduction of the temperature range, particularly a reduction of the maximum temperature of the soil due to the constant maintenance of vegetation cover. This low temperature makes the preconditioning time of *Striga* seeds longer (especially *S. asiatica* for which the optimal temperature for this phase is 30 °C) and may limit the germination (optimum temperature 30 °C) [1].

Service plants exert different effects on *Striga*. *Arachis* and *Stylosanthes* spp have a negative effect on *Striga*. For these plants, an infestation rate of 0.47 / m² was observed in the Middle West of Madagascar. *Arachis* spp and *Stylosanthes* are able to produce a sub shaded biomass (70-80% shading), thus unfavorable for the germination of *Striga* [7]-[8]. Finally, due to their contribution on organic matter, especially nitrogen, leguminous plants allow to control *Striga* [1].

Annexe 5: Combined effects of cover crops, mulch, zero-tillage and resistant varieties on *Striga asiatica* (L.) Kuntze in rice-maize rotation systems. Agriculture, Ecosystems and Environment 256, 23-33. (Article publié)

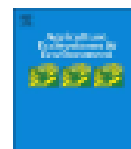
Agriculture, Ecosystems and Environment 256 (2018) 23–33



Contents lists available at ScienceDirect

Agriculture, Ecosystems and Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/agenv



Combined effects of cover crops, mulch, zero-tillage and resistant varieties on *Striga asiatica* (L.) Kuntze in rice-maize rotation systems



Meva Tahiry Randrianjafizanaka^a, Patrice Auffray^b, Alain Paul Andrianalivo^c,
Isabelle Ratsimiala Ramonini^a, Jonne Rodenburg^{d,*}

^a Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, BP 906, Antananarivo, Madagascar

^b Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIARD), BP 230, Antananarivo, Madagascar

^c Centre National de la Recherche Appliquée au Développement Rural (CNDRAR), BP 1444 Antananarivo, Madagascar

^d Africa Rice Center (AfricaRice), 20 BP 1029 ABIDJAN 01, Abidjan, Côte d'Ivoire

^e Natural Resources Institute (NRI), University of Greenwich, Chatham Maritime, Kent ME4 4TB, UK

ARTICLE INFO

Keywords:
Parasitic weeds
Conservation agriculture
NERICA rice varieties
Maize
Symbiont
Legumes

ABSTRACT

In low-input rice-maize rotation systems in the hills of central Madagascar, farmers deal with erratic rainfall, poor soils, high soil erosion risks and infestation by the parasitic weed *Striga asiatica* (L.) Kuntze. Practices combining zero-tillage with permanent soil cover by intercropped legumes and crop residue mulches — known as Conservation Agriculture (CA) — are proposed as remedy against soil and climatic constraints. Implications of these practices for *S. asiatica* are unknown. A 4-season factorial experiment compared the current farmer practice of rice — maize rotation, involving seasonal tillage and crop residue removal (CONV), with three rice — maize rotation systems following CA with different cover crops, i.e. *Vigna unguiculata* (cowpea) and *Mucuna pruriens* (CACM), *Vigna unguiculata* (ricebean) (CARB), and *Symbionter guianensis* (CAST). Performance of two rice varieties, NERICA-4 and — 9, with partial *S. asiatica* resistance, were compared with the locally popular R22. Parasite emergence time, numbers, and seed bank sizes were recorded.

In all CA practices *S. asiatica* infection was significantly reduced. Best results were obtained with *Symbionter guianensis* (CAST). This species also suppressed ordinary weeds much better than other cover crops. With CAST, average parasite emergence was delayed by 7.5 days (in rice) and 6.3 days (in maize) and infection levels were reduced by 79% (in rice) and 92% (in maize) compared to the conventional farmer practice (CONV). NERICA varieties delayed *S. asiatica* emergence by 5.7 days (NERICA-9) and 9.7 days (NERICA-4) and reduced infection levels by 57% (NERICA-9) and 91% (NERICA-4) compared to R22. In maize the residual effect of resistance of NERICA-4 resulted in a delay of 7.5 days in *S. asiatica* emergence and a reduction of 60% in parasite numbers. The best combinations delay *S. asiatica* emergence by 17.8 days (CAST + NERICA-9) and 18.1 days (CARB + NERICA-4) and reduce the parasite infection levels by 96% (CAST + NERICA-9 or — 4) to 90% (CARB + NERICA-4) in rice, compared to CONV + R22. After two full rice-maize rotation cycles *S. asiatica* seed numbers in the soil (0–10 cm) were 78% (CACM), 78% (CAST) and 86% (CARB) lower than under CONV. Even the combination of zero-tillage, crop residue mulching, cover crops and resistant rice varieties does not entirely prevent *S. asiatica* parasitism and seed bank increase. Additional measures, targeted to escaping weeds, would be required for fully effective and long-term control.

1. Introduction

Maize (*Zea mays* L.) and rice (*Oryza sativa* L. and *O. glaberrima* Steud.) are two of the most important food crops in sub-Saharan Africa (Shikurwa et al., 2011; Sack et al., 2012). Rice varieties adapted to low-draining upland soils can be grown under similar conditions as maize and both crops are therefore often grown by the same farmers, either intercropped or in rotation (Balabramanian et al., 2007; Shikurwa

et al., 2011). These farmers however face a number of —related or mutually reinforcing— production constraints, like drought, sub-optimal soil fertility and weed infestation (Balabramanian et al., 2007; Calme et al., 2012). *Striga* spp., are important weeds in both crops (e.g. Johnson et al., 1997). The two most important *Striga* species are *S. asiatica* (L.) Kuntze, with weedy forms predominantly found in Eastern and Southern Africa, and *S. hermannii* (Del.) Benth., mostly found in sub-Saharan Africa north of the equator (Mohamed et al., 2001).

* Corresponding author at Natural Resources Institute, University of Greenwich, Chatham Maritime, Kent ME4 4TB, UK.
E-mail addresses: rodenburgjonne@gmail.com, j.rodenburg@greenwich.ac.uk (J. Rodenburg).

<https://doi.org/10.1016/j.agenv.2017.12.005>

Received 26 October 2017; Received in revised form 8 November 2017; Accepted 5 December 2017
0167-6369/© 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.



Combined effects of cover crops, mulch, zero-tillage and resistant varieties on *Striga asiatica* (L.) Kuntze in rice-maize rotation systems



Meva Tahiry Randrianjafizanaka^a, Patrice Autray^b, Alain Paul Andrianaiivo^c,
Isabelle Ratsimiala Ramonta^a, Jonne Rodenburg^{d,e,*}

^a Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, BP 906, Antananarivo, Madagascar

^b Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (Cirad), BP 319, Antsirabe, Madagascar

^c Centre National de la Recherche Appliquée au Développement Rural (FOFIFA), BP 1444, Antananarivo, Madagascar

^d Africa Rice Center (AfricaRice), 01 BP 4029 ABIDJAN 01, Abidjan, Côte d'Ivoire

^e Natural Resources Institute (NRI), University of Greenwich, Chatham Maritime, Kent ME4 4TB, UK

ARTICLE INFO

Keywords:

Parasitic weeds
Conservation agriculture
NERICA rice varieties
Mucuna
Stylosanthes
Legumes

ABSTRACT

In low-input rice-maize rotation systems in the hills of central Madagascar, farmers deal with erratic rainfall, poor soils, high soil erosion risks and infestation by the parasitic weed *Striga asiatica* (L.) Kuntze. Practices combining zero-tillage with permanent soil cover by intercropped legumes and crop residue mulches — known as Conservation Agriculture (CA)— are proposed as remedy against soil and climatic constraints. Implications of these practices for *S. asiatica* are unknown. A 4-season factorial experiment compared the current farmer practice of rice – maize rotation, involving seasonal tillage and crop residue removal (CONV), with three rice – maize rotation systems following CA with different cover crops, i.e. *Vigna unguiculata* (cowpea) and *Mucuna pruriens* (CACM), *Vigna umbellata* (ricebean) (CARB), and *Stylosanthes guianensis* (CAST). Performance of two rice varieties, NERICA-4 and –9, with partial *S. asiatica* resistance, were compared with the locally popular B22. Parasite emergence time, numbers, and seed bank sizes were recorded.

In all CA practices *S. asiatica* infection was significantly reduced. Best results were obtained with *Stylosanthes guianensis* (CAST). This species also suppressed ordinary weeds much better than other cover crops. With CAST, average parasite emergence was delayed by 7.5 days (in rice) and 6.3 days (in maize) and infection levels were reduced by 79% (in rice) and 92% (in maize) compared to the conventional farmer practice (CONV). NERICA varieties delayed *S. asiatica* emergence by 5.7 days (NERICA-9) and 9.7 days (NERICA-4) and reduced infection levels by 57% (NERICA-9) and 91% (NERICA-4) compared to B22. In maize the residual effect of resistance of NERICA-4 resulted in a delay of 7.5 days in *S. asiatica* emergence and a reduction of 60% in parasite numbers. The best combinations delay *S. asiatica* emergence by 17.8 days (CAST + NERICA-9) and 19.1 days (CARB + NERICA-4) and reduce the parasite infection levels by 96% (CAST + NERICA-9 or –4) to 98% (CARB + NERICA-4) in rice, compared to CONV + B22. After two full rice-maize rotation cycles *S. asiatica* seed numbers in the soil (0–10 cm) were 76% (CACM), 78% (CAST) and 86% (CARB) lower than under CONV. Even the combination of zero-tillage, crop residue mulching, cover crops and resistant rice varieties does not entirely prevent *S. asiatica* parasitism and seed bank increase. Additional measures, targeted to escaping weeds, would be required for fully effective and long-term control.

1. Introduction

Maize (*Zea mays* L.) and rice (*Oryza sativa* L. and *O. glaberrima* Steud.) are two of the most important food crops in sub-Saharan Africa (Shiferaw et al., 2011; Seck et al., 2012). Rice varieties adapted to free-draining upland soils can be grown under similar conditions as maize and both crops are therefore often grown by the same farmers, either intercropped or in rotation (Balasubramanian et al., 2007; Shiferaw

et al., 2011). These farmers however face a number of —related or mutually reinforcing— production constraints, like drought, sub-optimal soil fertility and weed infestation (Balasubramanian et al., 2007; Cairns et al., 2012). *Striga* spp., are important weeds in both crops (e.g. Johnson et al., 1997). The two most important *Striga* species are *S. asiatica* (L.) Kuntze, with weedy forms predominantly found in Eastern and Southern Africa, and *S. hermonthica* (Del.) Benth., mostly found in sub-Saharan Africa north of the equator (Mohamed et al., 2001).

* Corresponding author at: Natural Resources Institute, University of Greenwich, Chatham Maritime, Kent ME4 4TB, UK.

E-mail addresses: rodenburgjonne@gmail.com, j.rodenburg@greenwich.ac.uk (J. Rodenburg).

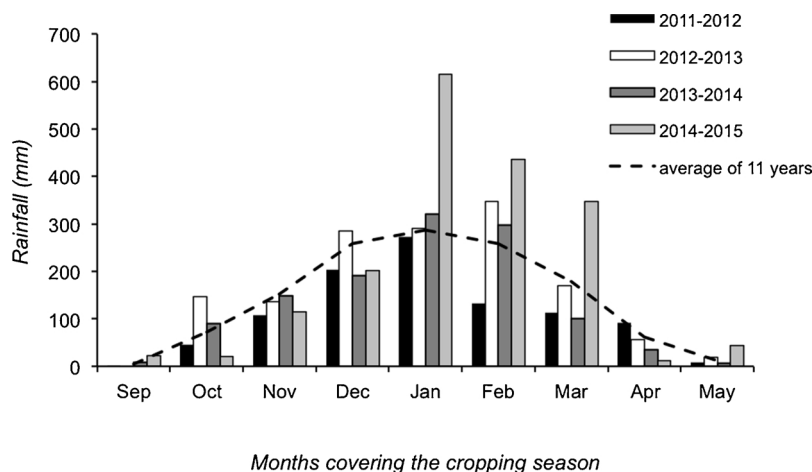


Fig. 1. Monthly rainfall (mm) per season, during the four cropping seasons from 2011–2012 (S1) to 2014–2015 (S4), and the 11-year average.

Infestation by *Striga* is one of the main biotic production constraints in maize in Africa (Shiferaw et al., 2011; Cairns et al., 2012), with a conservatively estimated incidence of 14% across the continent (De Groote et al., 2008). For rice the importance is less generally acknowledged (Schut et al., 2015) but the average incidence of *Striga* in rice is recently estimated at a conservative 12% (Rodenburg et al., 2016). Reported *Striga*-inflicted yield losses range from 21 to 74% in maize (De Groote et al., 2008) and from 35 to 80% in rice (Rodenburg et al., 2016).

In the mid-west of Madagascar, upland rice-maize rotations are often practiced on poorly textured and poorly fertile soils on sloping land and under conditions of erratic rainfall, with droughts alternated by intense rainfall events (e.g. Bruelle et al., 2015). Soil erosion by run-off therefore occurs frequently in this area (Dusserre et al., 2012). This further impoverishes the soils (Smaling et al., 1996), and facilitates weed seed dispersal (Burton et al., 2005). *Striga asiatica* is one of the most dominant weed species in these rice-maize rotation systems in Madagascar (Geiger et al., 1996). This, in turn, is no surprise as the presence of *Striga* species is often associated with poor soil fertility and erratic rainfall conditions (Kamara et al., 2014).

One of the possible strategies to address the above-described climate and soil-related problems in cereal cropping systems is to replace the practice of seasonal soil tillage and clearance, by an intercropping, zero-tillage system with permanent—living or dead—vegetative soil cover, commonly referred to as Conservation Agriculture (Thierfelder and Wall, 2009, 2012). In mid-west Madagascar, where rice-maize rotation is the predominant system, Conservation Agriculture (CA) practices have been tested with variable outcomes, as socio-cultural and economic benefits and suitability lagged behind agronomic and environmental merits (Sester et al., 2015). Positive effects of CA were reported on rice blast (Sester et al., 2014) and white grub, a soil-dwelling Scarab beetle larvae (Ratnadass et al., 2013). It is not known whether the proposed CA strategies also reduce *S. asiatica* infestation, but individual components proved successful. Intercropping may reduce *Striga* when the intercropped non-host species can cause seed of the parasite to germinate without supporting parasitism, a principle called ‘suicidal germination’ (e.g. Khan et al., 2010). The intercrop canopy can also reduce *Striga* by increased shading and humidity and decreased temperatures (Oswald et al., 2002). Mulching has also been shown to suppress *Striga* parasitism (Midega et al., 2013), probably partly through similar mechanisms, while zero-tillage may prevent newly produced *Striga* seed to enter the soil deep enough to encounter suitable host roots in subsequent cropping seasons (van Ast et al., 2005).

In the current study, effects of a combination of these measures on *S. asiatica* were tested in an infested farmer’s field in the rice-maize production zone of mid-west Madagascar. The practices were tested with rice varieties differing in resistance level. The use of resistant varieties

has often been suggested as an ideal component of an integrated *Striga* management strategy (e.g. Yoder and Scholes, 2010), but broad-based evidence for this is still scarce. The locally predominant farmer practice of rice-maize rotation with seasonal tillage and crop residue removal is treated as the reference. The objectives were to (1) find leads for improvements of this rice-maize rotation system that could benefit smallholder farmers, (2) quantify effects of different rice varieties, management practices and combinations of varieties and practices on *S. asiatica* control and (3) discuss possible factors explaining such effects.

2. Materials and methods

2.1. Study site

During four cropping seasons—in the period from December 2011 to April 2015—a factorial experiment was conducted at a farmer’s field in Ivory, in mid-west Madagascar. The field was located at 19°33′26″S and 46°24′55″E. The elevation at this site is 930 m above sea level.

The study area is characterized by a tropical climate of medium altitude with two well-defined seasons: the hot rainy season from November to April and the cold dry season from May to October. Temperature, radiation and rainfall data were recorded daily by an automatic meteorological station (ENERCO 404 Series, Cimel, France) at 835 m from the experiment. During the experiment (September to May) average monthly radiation ranged from 17 to 28 MJ m⁻², and temperatures ranged from 17.2 °C (night) to 30.7 °C (day), with monthly averages between 21 and 25 °C, and similar monthly fluctuations across seasons. The cumulative rainfall during the experiment was 976 mm in Season 1, 1452 mm in Season 2, 1194 mm in Season 3 and 1814 mm in Season 4 (Fig. 1). The long-term annual mean rainfall is 1307 mm.

The soil is characterized as clay-loam Oxisol (USDA) with a clay-silt-sand composition of 34–39–27% in the top layers (0–10 cm). The soil was generally moderately deficient in nutrient and organic matter content, with 17.2 g kg⁻¹ of C, 1.4 g kg⁻¹ of N (total) and 2.5 mg kg⁻¹ of available P (Olsen). Soil pH (H₂O) was 5.3. Nutrient content of applied cattle manure was 0.93% N, 11.9% C, 0.14% P, 0.94% K, 0.50% Ca, and 0.20% Mg. The field was positioned on a moderate slope (0 to 5%). Experimental replicates were laid out along this gradient with Replicate 1 on the top and Replicate 6 at the bottom of the slope.

2.2. Experimental treatments and plant material

The locally predominant farmer practice of rice-maize rotation with seasonal tillage and removal of crop residues (henceforward referred to as conventional practice, or CONV) is compared with three rice-maize rotation systems following conservation agriculture (CA) principles.

The three CA practices were (1) CACM: intercropping maize with cowpea (*Vigna unguiculata* [L.] Walp. cv David) and *Mucuna* (*Mucuna pruriens* [L.] DC. cv CTAS MU1); (2) CARB: intercropping maize with ricebean (*Vigna umbellata* [Thunb.] Ohwi & Ohashi cv. CTAS tsiasisa) and (3) CAST: intercropping rice and maize with *Stylosanthes* (*Stylosanthes guianensis* [Aubl.] Sw., cultivar CIAT 184). The choice of cover crop species is based on agronomic and weed control principles. For *Striga* control and soil conservation a suitable intercrop for these rice-maize rotation systems should have good soil coverage during the maize crop, produce enough biomass for mulch during the rice crop and also improve soil fertility. Suitable cover crop species for these systems and soil types, responding to that profile, were identified by Naudin et al. (2015a). From the range of crops they identified, three contrasting species, or species combinations were selected: (1) the short-cycle annual legumes *Vigna unguiculata* (cowpea) and *Mucuna pruriens* (velvet-bean), (2) the long-cycle annual legume *Vigna umbellata* (ricebean) and (3) the perennial legume *Stylosanthes guianensis* (stylo). Among these species, Velvet bean and cowpea have already shown to reduce *Striga* spp. problems (Oswald et al., 2002; van Mourik et al., 2008; Kiwira et al., 2009). Based on agronomic reasons (e.g. crop–crop competition, ease of management), Naudin et al. (2015a) also recommended rice not to be intercropped with the annual legumes cowpea, mucuna and ricebean. Maize, on the other hand is suitable for intercropping because of the relative large inter-plant spaces.

In all CA practices soils were only tilled at the onset of the first season and no longer thereafter and all crop residues—except grains, panicles and pods—were left on the field as mulch after harvest of crops and intercrops.

Three upland rice varieties were compared simultaneously: (1) the locally popular but *Striga*-susceptible B22, a Brazilian rice variety, and the more recently introduced NERICA (New Rice for Africa) varieties (2) NERICA-4 and (3) NERICA-9. NERICA-4 is *Striga*-resistant, while NERICA-9 is moderately *Striga*-resistant (Rodenburg et al., 2015). The NERICA varieties are offspring from interspecific crosses between the Asian rice species *Oryza sativa* L. and the African rice species *Oryza glaberrima* Steud. (Jones et al., 1997). The maize variety used in this study was IRAT 200, a commercially available but *Striga*-susceptible variety. It was sourced from Ambatolahy, a nearby village (19°34'37"S–46°26'37"E).

2.3. Experimental design

The experiment was laid-out following a split-plot design with cropping practices randomly assigned to the main plots and rice varieties randomly assigned to the sub-plots, in six replicates. Hence, rice variety was used as a sub-treatment factor, even in seasons with maize (to study potential carry-over effects of *S. asiatica* resistance). In order to study the main crops of this rotation each year, the main plots were divided in two, with rice grown in one part and maize in the other part.

The size of the main plot, representing a cropping practice, was 270 m² (15 × 18 m). Each of the three sub-plots, representing a rice variety, measured 90 m² (5 × 18 m). Each sub-plot, comprised one *S. asiatica* counting area of 37.8 m² (4.2 × 9 m) for rice and 36 m² (4 × 9 m) for maize, four non-overlapping *S. asiatica* seed bank sampling areas of 6 m² (2 × 3 m) and two non-overlapping soil sampling areas of 3 m² (0.6 × 5 m) for chemical analyses.

2.4. Field preparations and crop management

The experimental field was under fallow vegetation during the two years preceding the experiment. The field was ploughed in October 2011, using a tractor-mounted disc plow, and cleaned from all fallow vegetation by hand. After that, harrowing to a finer tilt was done using a tractor-mounted tooth peg harrow. In plots following conventional practice, from the second season onwards, tillage was done manually using a so-called *angady*, a local traditional soil tillage tool, at a depth of

15–20 cm. In plots following CA practices, the soil was not tilled beyond soil preparation for the first season.

Rice was sown from 5 to 8 December in 2011, 19 to 23 November in 2012, 18 to 22 November in 2013 and 24 to 28 November in 2014, at a planting distance of 20 cm in the row and 30 cm between the rows, at 6–7 seeds per planting hole. Maize was sown at the same dates as rice, in paired rows with 50 cm between the two rows of one pair and 150 cm between two pairs, at a rate of two seeds per hole and a within-row plant distance of 50 cm.

For CACM, cowpea was sown at the same time as maize, between two pairs of maize rows, at a rate of two seeds per hole and a plant distance of 25 cm in the row and 50 cm between the rows, resulting in two cowpea rows between each pair of maize. To enhance cover crop biomass production, at 50 days after sowing (DAS) one row of *Mucuna* was sown between two rows of cowpea and another row between the two rows of a pair of maize, at a rate of two seeds per hole. *Mucuna* was sown in relay with cowpea to maintain a vegetative ground cover beyond cowpea harvest and to avoid competition between the two cover crops.

For CARB, ricebean was sown at the same time as maize with two rows of ricebean between two pairs of maize rows, at a rate of 5–7 seeds per hole and a planting density of 50 cm in the row and 50 cm between rows. To increase the biomass of ricebean an additional row was sown in between the paired rows of maize at 50 DAS.

In plots following cropping practice CAST, in the first year, *Stylosanthes* was sown at 14 DAS at 40 cm in the row and 30 cm between rows, between the rice or maize at a seeding rate of about 5 kg ha⁻¹. *Stylosanthes* was sown later to provide the main crop with a head start reducing early-season crop competition. Between two rows of rice, one row of *Stylosanthes* was sown, with 15 cm between the *Stylosanthes* and the rice. Between two pairs of maize rows three rows of *Stylosanthes* were grown, with 45 cm between the maize and the *Stylosanthes* at each side. Between two seasons (i.e. the period May–December), *Stylosanthes* was rolled and slashed back three times: (1) At the end of the rainy season, around mid-June, (2) Half-way the dry season, mid-September and (3) Before sowing of the next crop, at the beginning of November. *Stylosanthes* plants were allowed to re-sprout and seeds produced in the previous year were allowed to germinate and grow.

In each season and for all practices, cattle manure was applied at sowing at a rate equivalent of 11 t ha⁻¹ in the rice plots and 5.5 t ha⁻¹ in the maize plots, following local practices. No inorganic fertilizers were applied. All plots were hand weeded two times during the season, at 46–50 and 74–85 DAS, whereby all weeds other than *Striga* were removed.

2.5. Measurements and observations

To assess treatment effects on soil fertility, after Season 1 (June 2012) and after Season 4 (June 2015) nine soil samples (0–10 cm depth) were done in each maize and rice plot. Each sample contained 196.3 cm³ of soil. For each plot a composite sample of 500 g air-dried and sieved (at 2 mm) soil was extracted for nitrogen (N Kjeldahl), and available phosphorus (Olsen) assessment at the Radio-Isotope Laboratory of the University of Antananarivo in Madagascar.

To assess treatment effects on the *S. asiatica* seed bank in the soil, sampling of the upper 10 cm of soil was done at the onset of the experiment in rice sub-plots (November 2011), and at the end of the experiment (June 2015), in the same sub-plots, after the maize crop harvest (hence after two complete cycles of the rice-maize rotation). At both dates six soil samples each 1,130.4 cm³ were taken per sub-plot—from fixed locations outside areas used for other sampling—and mixed into one composite sample per replicate from which 100 g (106 cm³) was sub-sampled for *S. asiatica* seed extraction and analysis following Hartman and Tanimonure (1991).

Striga asiatica emergence (i.e. first cotyledon appearance) dates were registered, each season in both crops except for the first season in

maize. Aboveground *S. asiatica* numbers were assessed at 70, 90 and 110 days after sowing (DAS) from the central 37.8 m² (rice) and 36 m² (maize) areas. To investigate treatment effects on ordinary weeds, biomass of weeds other than *S. asiatica* was assessed in the fourth season (2014–2015) from four 1.0 × 0.9 m areas within the central area per sub-plot. These weeds were sampled twice, just prior to each manual weeding intervention, and were oven-dried during 48 h at 60 °C for dry matter assessment.

2.6. Analyses

For *S. asiatica* emergence dates (*E-date*) data were expressed as days after sowing (DAS). Cases where *S. asiatica* was not observed were treated as missing data. Based on emerged *S. asiatica* counts at three dates (70, 90 and 110 DAS) the maximum aboveground *S. asiatica* numbers were assessed, and this parameter (*NSmax*) was used for further analysis. All data were checked for homoscedasticity and normality following Sokal and Rohlf (1995). *NSmax* was subjected to logarithmic (Log10) transformations, following (Log [*X* + *C*]), where *X* was the original, individual observation and *C* was set to 1.0. Data on aboveground parameters (*E-date*, *NSmax* and Weed Biomass) were subjected to ANOVA, using a mixed model where Season, Cropping Practice and Variety—for *Striga* parameters—and Weeding Time, Cropping Practice and Variety—for ordinary weed biomass—were considered as fixed effects and Cropping Practice × Replicate as random effect (following the split-plot experimental design). Soil fertility parameters (total N and available P) were subjected to ANOVA, using a mixed model, with Time (Season 1, Season 4) and Cropping Practice as fixed effects and Cropping Practice × Replicate as random effect. Adjusted means of all parameters were compared by using Fisher's LSD test. Means and LSD values presented in the paper are back-transformed when necessary. Data on aboveground parameters were analyzed with XLSTAT version 2014.5.03 (MS Excel, 2014).

Striga asiatica seed numbers extracted from the soil after four experimental seasons (two rotation cycles), were analyzed using a generalized linear mixed model with a negative binomial distribution to account for the count data. Seed numbers prior to the experiment (*S0*) were used as co-variable and we conducted an ANCOVA to test whether they (*S0*) affected the seed numbers after four seasons. In case this was not significant, an ANOVA was performed, with rice variety (*V*) and Cropping Practice (*CP*) as fixed effects and Replicate as random effect, followed by a comparison of means—when effects were significant—using Tukey's honest significant difference test. *Striga asiatica* seed data were analyzed using SAS/STAT software, Version 9.2 of the SAS System for Windows (SAS Institute, 2011).

3. Results

3.1. Soil nitrogen and phosphorus changes

No significant two-way interaction effects between time and cropping practice were observed on total soil nitrogen or available soil phosphorus. Among main effects, only time had a significant ($F = 35.53$; $P = 0.002$; $df = 1$) effect on total soil nitrogen content. In 2011, mean N content (0–10 cm) was 1.433 g kg⁻¹, and this significantly increased to 1.685 g kg⁻¹ in 2015. No time or cropping practice effects on available phosphorus were observed.

3.2. *Striga asiatica* emergence dates in rice and maize

Table 1 shows significant main effects of season ($P < 0.0001$ in rice; $P = 0.002$ in maize) and rice variety on dates of first *S. asiatica* emergence in rice ($P < 0.0001$) and maize following rice ($P < 0.01$). Cropping practice only had a near-significant effect on *S. asiatica* emergence dates in rice ($P = 0.07$). Season × rice variety and cropping practice × rice variety interaction effects on *S. asiatica* emergence dates

were significant in rice only ($P < 0.05$; Table 1). No other significant interactions were observed.

First *S. asiatica* emergence dates range from 69 (Season 1) to 76 (Season 4) DAS in rice and from 60 (Season 2) to 68 DAS (Season 3) in maize (Table 2). Across seasons, *S. asiatica* emergence is earliest in plots with rice variety B22 (67 DAS) and latest with NERICA-4 (77 DAS). The same effect is observed in maize plots preceded by rice, with first emergence at 60 DAS in plots following B22, and 68 DAS in plots following NERICA-4.

In rice, across seasons, *S. asiatica* emerged earliest with variety B22 under CONV (62 DAS), and latest with NERICA-4 following CARB (81 DAS) and with NERICA-9 following CAST (79 DAS).

3.3. Aboveground *S. asiatica* densities in rice

Significant season, cropping practice and rice variety main effects ($P < 0.0001$) were observed on aboveground *S. asiatica* plant densities (maximum number m⁻²; *NSmax*) in rice (Table 1). Season × cropping practice ($P = 0.006$), season × rice variety and cropping practice × rice variety ($P < 0.0001$) interaction effects on *NSmax* were also significant.

CAST had the lowest *S. asiatica* densities among cropping practices, followed by CARB (Table 3). Under conventional practice (CONV), the *S. asiatica* density across seasons was significantly higher than under any CA practices, but evaluated per season, only CAST resulted in consistently reduced parasite densities compared to CONV. Relative to CONV, *S. asiatica* densities were on average reduced by 24% following CACM, by 53% following CARB and by 79% following CAST.

Striga asiatica densities under NERICA-9 and NERICA-4 were significantly lower than under B22 (Table 3). The difference between B22 and moderately resistant NERICA-9 was only significant in the two last seasons, when *S. asiatica* infection levels were generally higher. The more resistant variety NERICA-4 had significant lower infection levels than B22 throughout the four seasons. Relative to B22, the reduction in *S. asiatica* densities was 57% under NERICA-9 and 91% under NERICA-4. The *S. asiatica* densities under NERICA-4, in turn, were significantly lower than under NERICA-9.

Across seasons, highest *S. asiatica* densities were observed under CONV with B22. With any of the NERICA varieties under CONV these numbers were already significantly lower. Even lower infection levels were obtained when NERICA varieties were combined with CA cropping practices, although for the most resistant variety—NERICA-4—differences in *S. asiatica* densities across cropping practices were not significant. The best combinations were NERICA-4 under CARB, followed by CAST and CACM and NERICA-9 under CAST (Table 3). Relative to CONV with B22, infection levels were reduced by more than 95% following these combinations.

3.4. Aboveground *S. asiatica* densities in maize

Significant season, cropping practice, and rice variety main effects and season × cropping practice, cropping practice × rice variety and season × cropping practice × rice variety interaction effects (all $P < 0.01$) were found on aboveground *S. asiatica* densities in maize (Table 3). Statistical analysis was done from Season 2 onwards, as in Season 1 the maize was not preceded by rice.

Across seasons, the conventional practice (CONV) showed significant higher *S. asiatica* infection levels than any CA practice (Table 3). Among CA practices, CAST resulted in significant lower infection levels compared to CACM and CARB. The latter practices reduced *S. asiatica* infection overall by 35%, compared to CONV, whereas CAST reduced infection even by 92%. CAST resulted in significant reductions in parasite infection in Season 2 and 3, but not in Season 4. The other two CA practices were only effective in Season 2.

In maize following rice variety NERICA-4, the *S. asiatica* density averaged over all three seasons, was significantly lower than in maize

Table 1

Analysis of variance of first emergence date (*E-date*) and maximum aboveground numbers (*NSmax*) of *S. asiatica* in rice and maize, with season (S), cropping practice (CP), rice variety (V) and interactions as sources of variation.

Source	df	<i>S. asiatica</i> in rice				<i>S. asiatica</i> in maize				
		<i>E-date</i>		<i>NSmax</i>		<i>E-date</i>		<i>NSmax</i>		
		F	P	F	P	F	P	F	P	
Season (S)	3	12.6	< 0.0001	67.5	< 0.0001	2	6.6	0.002	6.7	0.0016
Cropping practice (CP)	3	2.9	0.07	16.9	< 0.0001	3	2.4	0.10	14.5	0.0003
Variety (V)	2	13.9	< 0.0001	83.4	< 0.0001	2	6.8	0.001	14.3	< 0.0001
S × CP	9	0.6	0.79	2.7	0.006	6	1.6	0.14	9.1	< 0.0001
S × V	6	2.6	0.02	7.7	< 0.0001	4	0.68	0.61	1.0	0.4159
CP × V	6	2.4	0.03	5.1	< 0.0001	6	0.89	0.50	4.1	0.0008
S × CP × V	18	0.6	0.92	1.3	0.17	12	1.1	0.35	2.7	0.0028

Table 2

Means and standard errors of differences (SED) of first *S. asiatica* emergence date (*E-date*; in days after sowing, DAS) in rice and maize, following four cropping practices (CP; CONV, CACM, CARB and CAST) and three rice varieties (V; B22, NERICA-9 and NERICA-4) during four cropping season (S1–S4).

Days to <i>S. asiatica</i> emergence in rice (<i>E-date</i> ; DAS)							Days to <i>S. asiatica</i> emergence in maize (<i>E-date</i> ; DAS)					
		S1	S2	S3	S4	Mean	S1	S2	S3	S4	Mean	
S × CP	CONV	76.9	72.9	59.9	64.7	68.6	–	55.3	64.4	63.0	60.9	
	CACM	78.9	72.3	65.0	73.3	72.4	–	62.9	71.6	63.2	65.9	
	CARB	77.7	72.9	66.9	68.7	71.6	–	59.1	69.0	58.4	62.2	
	CAST	79.1	78.6	70.3	76.2	76.1	–	64.0	66.2	71.3	67.2	
	Mean (S)	68.6	B ^a	72.4	AB	71.6	B	76.1	A	64.0	AB	
	LSD (S)	4.20						4.04				
S × V	B22	76.1	abc	69.4	cd	56.7	e	65.8	d	67.0	Z	–
	NERICA-9	77.8	ab	78.8	a	63.8	de	70.6	bcd	72.7	Y	–
	NERICA-4	80.5	a	74.3	abc	76.1	abc	75.8	abc	76.7	X	–
	LSD (V)	3.64								4.04		
	LSD (S × V)	7.28										
	CONV	61.5	f	67.3	def	65.0	ef	74.2	abcd	59.0	CONV	CACM
CP × V	NERICA-9	68.6	cdef	73.9	abcd	69.1	bcde	79.3	a	62.4	67.2	58.2
	NERICA-4	75.7	abc	75.9	ab	80.6	a	74.6	abc	61.2	71.4	68.5
	LSD (CS × V)	7.28										
	CONV	61.5	f	67.3	def	65.0	ef	74.2	abcd	59.0	CONV	CACM

^a Means followed by different letters are significantly different ($P < 0.05$).

following rice varieties NERICA-9 and B22 (Table 3). Compared to B22, densities were reduced by 20% following NERICA-9 and by 60% following NERICA-4. The most significant reduction in *S. asiatica* densities in maize was obtained with CAST in plots preceded by NERICA-9 and NERICA-4. Changing the preceding rice variety from B22 to NERICA-4 under CONV already reduced *S. asiatica* infection in maize by 79%. Changing the cropping practice of maize, with B22 as preceding rice variety, from CONV to CAST, reduced *S. asiatica* infection by 95%. Combining the two options—maize under CAST following NERICA-4—reduced the parasite density by 97% compared to the conventional practice following B22.

3.5. *Striga asiatica* seed bank changes

Only the cropping practice had a significant effect on *S. asiatica* seed densities after four seasons (Table 4). *Striga asiatica* seed densities in the soil are significantly higher after conventional rice-maize rotation (CONV), compared to any of the CA practices (CACM, CARB and CAST) while differences between CA practices were not significant (Table 4). Compared to CONV, *S. asiatica* seed densities in the soil can be reduced by a factor 4 (CACM) to 7 (CARB) after four seasons. None of the treatments however resulted in a decrease of the *S. asiatica* seed bank size compared to the initial situation (not shown).

3.6. Effects of cropping practice and rice variety on ordinary weed biomass

No significant three-way or two-way interaction effects between weeding intervention time, rice variety and cropping practice were observed on ordinary weed biomass in rice in Season 4. Among the

main effects, only weeding intervention time ($F = 15.7$; $P = 0.0001$; $df = 1$) and cropping practice ($F = 83.5$; $P < 0.0001$; $df = 3$) had significant effects on weed biomass. Both CONV and CAST, had significant less weed biomass than the other two practices (Fig. 2). The practice with cowpea-*Mucuna* (CACM) had a significant higher weed biomass than the practice with rice bean (CARB).

4. Discussion

This study showed that through a combination of zero-tillage, crop residue mulching and cover crops—collectively indicated as Conservation Agriculture (CA)—*S. asiatica* infection in a rice-maize rotation could be delayed and reduced. The best results were obtained with *S. guianensis* as cover crop and NERICA-4 as variety, whereby control effects of this resistant rice variety were noticeable in the following maize crop. *Stylosanthes guianensis* also proved effective in terms of ordinary weed control.

This section is broken down in a discussion on the benefits of conservation agriculture (CA) practices regarding weed and *Striga* control (4.1), the role that resistant varieties can play to enhance *Striga* control efficacy under CA (4.2) and the notion that such innovations are only relevant in areas where smallholder cereal farmers deal with similar (parasitic) weed and soil constraints as encountered in the study area (4.3).

4.1. Can conservation agriculture contribute to (parasitic) weed control?

Conservation agriculture (CA) is a broad term to describe the more or less simultaneous application of (1) reduced soil tillage, (2)

Table 3
Means of maximum aboveground *S. asiatica* numbers (NS_{max} ; m^{-2}) in rice and maize, following four cropping practices (CP; CONV, CACM, CARB and CAST) and three rice varieties (V; B22, NERICA-9 and NERICA-4) during four cropping season (S1–S4).

Maximum <i>S. asiatica</i> densities in rice (<i>NS</i> _{max} ; plants m ⁻²)										Maximum <i>S. asiatica</i> densities in maize (<i>NS</i> _{max} ; plants m ⁻²)											
		S1 ^a		S2		S3		S4		Mean		S1 ^b		S2		S3		S4		Mean	
S × CP	CONV	0.5	efgh ^{a1}	1.6	cd	8.7	a	1.6	a	2.1	A	0.05	A	9.4	a	1.7	bc	1.9	bc	3.4	A ¹
	CACM	0.3	gh	0.9	defg	5.3	b	1.9	b	1.6	B	0.05	B	1.9	bc	2.1	b	2.8	b	2.2	B
	CARB	0.2	h	0.5	fgh	3.3	b	1.0	cdef	1.0	C	0.03	C	2.7	b	1.9	bc	2.0	bc	2.2	B
	CAST	0.2	h	0.1	h	1.3	cde	0.4	efgh	0.4	D	0.04	D	0.00	d	0.00	d	1.0	c	0.3	C
	Mean	0.28	I	0.69	J	3.92	L	1.14	K	2.14				2.3	A	1.2	B	1.8	A		
		LSD (S)	0.22									0.23									
		LSD (CP)	0.22									0.27									
		LSD (S × CP)	0.48									0.52									
S × V	B22	0.66	def	1.5	c	12.2	a	2.9	b	2.8	A			3.7		1.59		2.4		2.5	A
	NERICA-9	0.20	fg	0.9	cd	4.1	b	1.0	cd	1.2	B			2.6		1.57		1.9		2	A
	NERICA-4	0.1	g	0.1	g	0.8	de	0.3	efg	0.3	C			1.1		0.65		1.3		1	B
	LSD (V)	0.19										0.23									
	LSD(S×V)	0.41																			
CP × V	CONV			CACM		CARB		CAST				CONV		CACM		CARB		CAST			
	B22	6.1	a	4.1	a	2.1	b	0.9	cd			7.0	a	2.7	bcd	2.5	bcd	0.4	fg		
	NERICA-9	2.2	b	1.6	bc	1.2	c	0.3	e			3.1	bc	2.2	bcd	3.9	b	0.2	g		
	NERICA-4	0.4	de	0.3	e	0.1	e	0.2	e			1.5	cd	1.8	cde	0.9	ef	0.2	g		
	LSD (CP × V)	0.41											0.52								

^a Means and LSD values are back-transformed after analysis; means followed by different letters are significantly different ($P < 0.05$).
^b No rice variety factor in S1.

Table 4

Results of the three-stage analysis of *S. asiatica* seed numbers in the soil, following a negative binomial distribution with 1. Analysis of Co-variance (ANCOVA), 2. Analysis of variance (ANOVA), and 3. Comparison of means (Tukey's). Rice variety (V), cropping practice (CP), seed numbers at the start of the experiment (S0), and interactions are sources of variation in the ANCOVA, and rice variety (V), cropping practice (CP) and interactions are sources of variation in the ANOVA. Means of *S. asiatica* seed numbers in the soil at 0–10 cm depth (seeds m⁻²), are compared across four cropping practices (CP; CONV, CACM, CARB and CAST).

Analysis	Effect	df	F	P
1. ANCOVA	Variety (V)	2	3.61	0.04
	Cropping Practice (CP)	3	11.04	0.00
	V × CP	6	0.74	0.62
	Seed # at start (S0)	1	0.34	0.56
	S0 × V	2	0.53	0.60
	S0 × CP	3	0.95	0.43
	S0 × V × CP	6	1.25	0.31
2. ANOVA	Variety (V)	2	1.77	0.18
	Cropping Practice (CP)	3	9.77	< 0.0001
	V × CP	6	0.89	0.51
	Cropping Practice			<i>S. asiatica</i> seed number m ⁻² (0–10 cm)
3. Comparison of means	CONV	8022		a ^a
	CACM	1943		b
	CAST	1725		b
	CARB	1098		b

^a Means followed by different letters are significantly different ($P < 0.0001$).

permanent soil protection through mulching and (3) increased biodiversity through crop diversification (Scopel et al., 2013). In the current study, three CA practices, with different crop diversification options—rice rotated with a maize-cowpea-*Mucuna* or maize-ricebean intercrop, and rice intercropped by *Stylosanthes* and rotated with a maize-*Stylosanthes* intercrop—were compared with the conventional farmer practice of rice-maize rotation without intercropping. This study presents the first evidence that applying a CA practice significantly delays parasitism of a *Striga* species and reduces parasite infection levels in both rice and maize. A wide range of direct and indirect causes may underlie the observed effect of CA practices (Fig. 3). These causes can be physical, biochemical or biological, they can emerge at different levels and they can either strengthen or weaken one another. All of the CA practices, by not tilling the soil, may reduce parasite infection because less *Striga* seeds reach the root zone (e.g. van Ast et al., 2005). In addition, the seeds remaining at the soil surface may be prone to increased seed predation by ground beetles as shown with ordinary weed seeds (Kulkarni et al., 2015). The increased living and dead biomass of cover crops, in addition, may further increase abundance and activity of the micro-fauna and therefore seed predation (Pullaro et al., 2006) and decay. Because of the entanglement of the different components of CA,

and the numerous potential direct and indirect effects they may unleash (as shown in Fig. 3), the contribution of individual principles cannot be assessed by this study. This is the typical weakness of many CA studies, as previously postulated by Giller et al. (2009). It is indeed essential to further investigate the effectiveness or ineffectiveness of each of the components as it would help optimizing or simplifying the approaches for smallholder farmers.

The set-up of the current study does however allow assessment of the role of different cover crop species within the CA practices, because the other treatments (zero-tillage and non-removal of crop residues) are the same across practices. Cover crops may differ in their effectiveness to (1) cause suicidal germination, (2) improve soil fertility (3) and produce biomass, providing (weed-suppressive, temperature decreasing and humidity increasing) canopy and mulch.

The *S. asiatica* suppressive effect of CA practices could be due to the suicidal germination of *S. asiatica* seeds caused by the cover crops (Fig. 3). Several leguminous crops have shown to be effective trap crops for *Striga* species that parasitize on cereal crops (Ransom, 2000). There are studies that confirm effectiveness of cowpea (Carsky et al., 1994; Gbehounou and Adango, 2003) and *Mucuna* (Kiwia et al., 2009) in that respect, although the mechanisms of suppression by *Mucuna* are not yet revealed. Whether *Stylosanthes* can cause suicidal germination of *S. asiatica* is subject to further studies. For a perennial species like *Stylosanthes*, it would be a very effective *S. asiatica* control mechanism, as it would work during both seasons of the rotation cycle.

Leguminous cover crops may also increase soil fertility and thereby contribute to *S. asiatica* suppression. Legumes that are able to fix atmospheric nitrogen can improve soil N content after several cropping cycles (e.g. Giller, 2001) but this process requires additional phosphorus (Rotaru and Sinclair, 2009). Both N and P play important roles in the production of host-root derived strigolactones (Yoneyama et al., 2013) whereby increasing levels of these elements can reduce the production of these plant hormones and decreasing levels will do the opposite. Changes in N and P consequently affect the *S. asiatica* infection chances (Jamil et al., 2012). In the current study the changes in either soil N or P, observed by comparing the situation before and after the 4-season experiment, were not significantly affected by cropping practices. Hence the observed differences in *S. asiatica* infection across cropping practices cannot be assigned to differences in soil fertility enhancing effects of these treatments.

Increased shading by the cover crops could be another explanation for *S. asiatica* suppression following CA practices (Fig. 3). *Stylosanthes* spp. are known for their prolific biomass production and therefore often proposed as weed control agents in tropical cereal cropping systems (Chikoye et al., 2008; Saito et al., 2010). It is likely that the *S. asiatica* control obtained by *Stylosanthes*, is at least partly due to this very weed suppressive ability, as the current study also shows superior control of ordinary weeds, compared to the other CA practices. Weed competition constitutes a major weakness of CA unless the ground cover would be

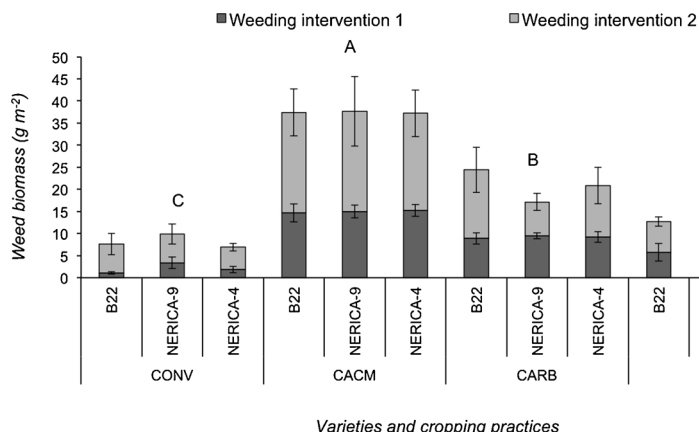


Fig. 2. Weed biomass dry weight in season 4 with weeding time (Dark grey: W1; Light grey: W2), cropping practice (CONV, CACM, CARB, CAST), rice variety (B22, NERICA-9, NERICA-4) as factors. Comparison of means conducted on total (W1 and W2 samplings) weed biomass dry weights per cropping practice (WBtot; g m⁻²). Different letters (A, B, C) indicate significant differences ($P < 0.0001$).

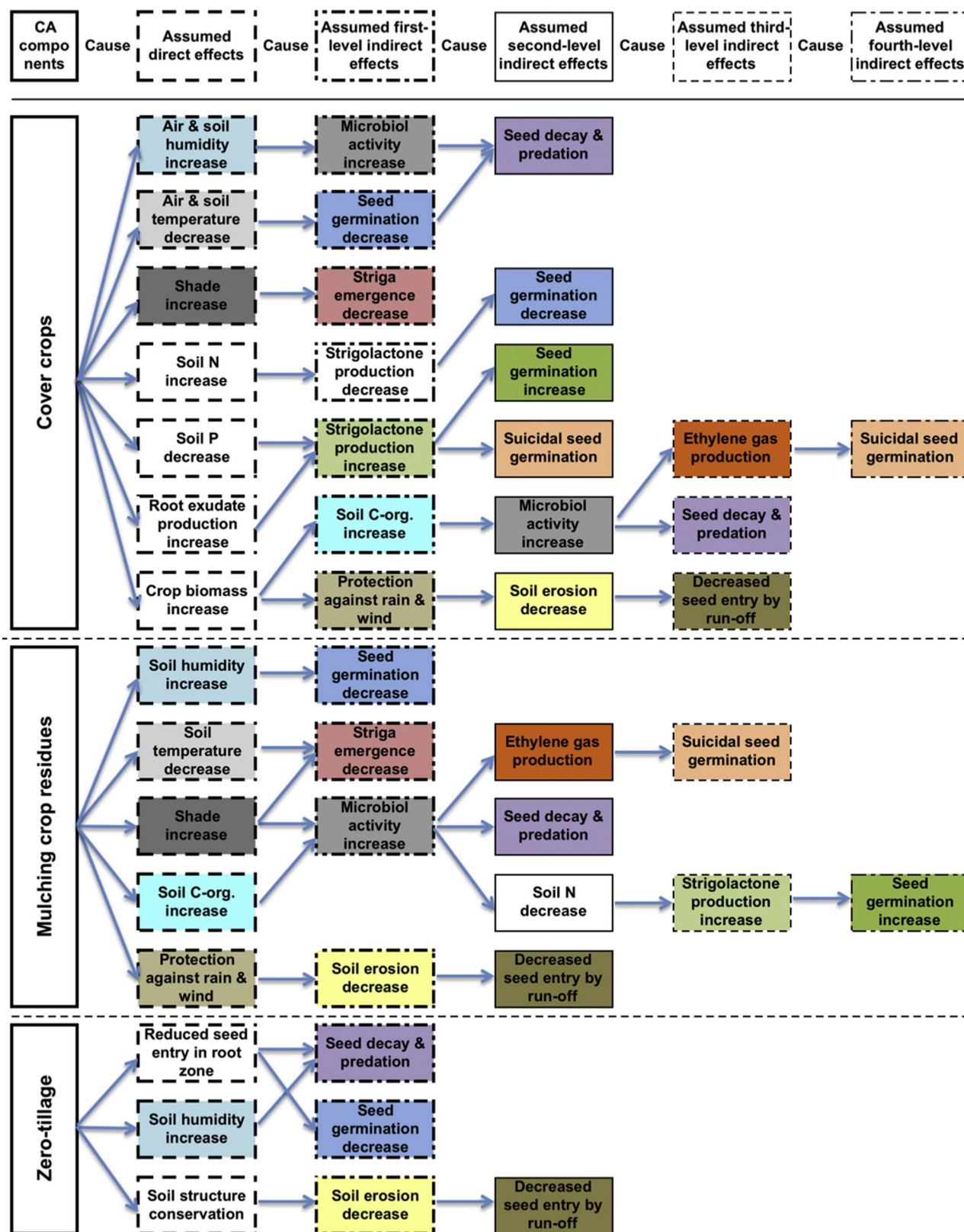


Fig. 3. Assumed direct and indirect causal relations between Conservation Agriculture (CA) components — cover crops, crop residue mulching and zero-tillage — and *S. asiatica*. Boxes with the same border style indicate the same level in process. Boxes of the same color indicate the same assumed effect.

effective enough to suppress weeds (Giller et al., 2009). The current study seems to confirm this. Averaged over four seasons, CACM and CARB produced respectively 1.3 to 1.8 times the crop residue biomass produced under CONV, while CAST produced 6.7 times as much

biomass (Randrianjafizana, unpublished). One obvious reason for this differentiation is, again, the cycle length of cover crop species. While cowpea, *Mucuna* and ricebean are annual species that are only intercropped with maize, *Stylosanthes* is a perennial producing biomass

in both the maize and the rice season.

4.2. What is the combined effect of conservation agriculture and resistant varieties on *S. asiatica*?

Clear *S. asiatica*-reducing effects of zero-tillage cropping practices with cover crops, crop residue mulching and the use of resistant rice varieties have been observed in both cycles of a rice-maize rotation system, compared to the farmer practice with the locally popular variety B22. Both a change in cropping practice and a change in rice variety contributed to this observed effect, and the different solutions have shown to be synergistic. Hence inclusion of a resistant rice variety in an integrated *Striga* management strategy, as previously proposed by many authors and for different crops (e.g. Kamara et al., 2008; Yoder and Scholes, 2010), proved indeed important here.

Striga asiatica resistance of the two NERICA varieties showed to be an important cause of *Striga* suppression under all practices. While existence of differences in *Striga* resistance among rice germplasm have been shown before (Johnson et al., 1997; Rodenburg et al., 2015, 2017) their compatibility with alternative cropping practices and synergy with other *Striga* control options are shown here for the first time. Moreover, this is the first study to show a positive carry-over effect of resistance in rice on the infection levels in the following maize crop. Therefore, the use of resistant varieties seems a very useful component technology in crop rotation systems, where two suitable hosts of the same parasite are alternated.

An integrated *Striga* management strategy should ideally reduce the seed bank (Westerman et al., 2007). In the current study no variety by cropping practice interaction effects on the *S. asiatica* seed bank were observed. CA practices alone, irrespective of cover crop species, showed reduced seed bank size increments compared to the conventional practice, but no seed bank size reduction compared to the situation before the experiment. Previously, van Mourik et al. (2008) showed a limited effect of legume intercropping on the *S. hermonthica* seed bank. Seed output from the seed bank is caused by decay, predation and germination. Under CA the latter category is reduced, causing a reduced seed output. With respect to seed input, only few reproductive *Striga* plants per area are required to replenish or even increase the seed bank (Rodenburg et al., 2006).

Despite differences in resistance among rice varieties, and contradicting the observed carry-over effect of resistance, the factor variety also had no significant effect on the *S. asiatica* seed bank size over time. The use of *Striga*-resistant host plant varieties has shown before to decrease the production of parasite seed numbers compared to susceptible varieties, without concomitant reductions in the seed bank size (Rodenburg et al., 2006). This is mainly due to the prolific seed production of *Striga*, with an estimated production of close to 1200 seeds per capsule for related *S. hermonthica* (van Delft et al., 1997). A modeling study showed that a decrease in the *Striga* seed bank could only be attained with varieties with either very successful pre-attachment resistance mechanisms—i.e. low production of germination stimulants—or with a combination of resistance mechanisms that affect the parasite at later stages (Westerman et al., 2007). In the current study, despite the combination of pre- (Jamil et al., 2011) and post-attachment (Cissoko et al., 2011) resistance in NERICA-4, a decrease in the seed bank could not be achieved. It should be stressed however that the rice in this experiment, irrespective of the resistance level of the variety, was followed each next season by a susceptible maize crop.

Compared to the conventional combination of B22 under conventional tillage and crop removal, the combination of NERICA-4 grown in zero-tillage plots with ricebean intercropping in the previous season and mulching of crop residues—among the best combination in terms of control—, resulted in an average delay in *S. asiatica* emergence of 19 days. Also with other combinations of CA practices and improved varieties, important delays in *S. asiatica* emergence were obtained. Delaying *Striga* parasitism has proven to be an important strategy to

reduce overall parasite biomass—and consequently parasite reproduction—and to minimize *Striga*-induced crop losses (van Ast and Bastiaans, 2006), hence this finding potentially has great significance for farmers dealing with *Striga* infestation.

The observations concerning differences in *S. asiatica* emergence dates and infection rates also reiterate the importance of integrating management options. With the use of a resistant variety (NERICA-4) alone, parasitism can be delayed by nearly 10 days compared to the susceptible rice variety (B22). When it is combined with the other strategies—i.e. cover crops, mulching of crop residues, zero-tillage—this delay can be almost doubled. Likewise, a change from conventional to a CA practice using ricebean or *Stylosanthes*, reduced infection levels by 53 and 79%. The use of resistant NERICA varieties compared to the susceptible variety B22 reduced infection levels with 57% (with NERICA-9) and 91% (NERICA-4). Combinations of these practices and varieties resulted in reductions of 96 (NERICA-9 and –4 with CAST) to 98% (NERICA-4 with CARB).

4.3. Implications for smallholder cereal farmers in *Striga*-prone areas

This study confirms the broadly accepted assumption, supported by a relatively scant body of evidence (e.g. Schulz et al., 2003; Aliyu et al., 2004; Ellis-Jones et al., 2004; Kamara et al., 2008; Tesso and Ejeta, 2011), that an integrated *Striga* management approach indeed works. It seems however impossible to reach 100% control, even with combinations of highly efficient technologies. For long-term beneficial effects, farmers following this approach are therefore recommended to continue uprooting escaping parasites by hand before they flower, to avoid replenishment or even a buildup of the seed bank.

Smallholder cereal farmers working in *Striga*-prone areas could be reluctant to adopt the practices studied here. Growing an intercrop usually requires more labor, for crop establishment and harvesting. A perennial like *Stylosanthes* also requires additional work, as the cover crop needs to be rolled or slashed before planting the next crop (see Section 2.4) and sometimes also during the season, to avoid undesired competition with the main crop.

Mulching crop residues implies a clear trade-off with other uses of crop biomass, such as feeding cattle (Naudin et al., 2015b). Finally, an important driver for adoption of alternative crop management strategies is the level of crop yields. On this point, CA often underperforms, at least in first ten years after introduction (Giller et al., 2009). One of the reasons is that cereal crop residues have a high C:N ratio resulting in immobilization of nitrogen, and additional (and costly) mineral fertilizer inputs seem therefore necessary to compensate this (Vanlauwe et al., 2014).

Conservation agriculture practices need to be adjusted to the locally prevailing conditions, to render them useful for smallholder farmers (Knowler and Bradshaw, 2007). The successful control of *S. asiatica* by practices investigated in the current study, suggests that in areas where *Striga* is a dominant production constraint, this strategy—or components of it—will be a good fit for smallholder farmers.

5. Conclusion

Conservation agriculture (CA) practices, combining leguminous cover crops with zero-tillage and crop residue mulching, delay and reduce *Striga asiatica* infection in rice-maize rotation systems. These practices also slow down seed bank increments compared to conventional rice – maize rotations. Most effective cover crop in terms of *S. asiatica* control is *Stylosanthes guianensis*. This species also proved to be the only cover crop capable of keeping ordinary weed biomass at similar, manageable levels as under the conventional practice with seasonal tillage. The weed suppressive nature of *Stylosanthes* is probably due to its perennial nature and high biomass production. This is also thought to be one of the reasons for the effective *S. asiatica* suppression. However, as good *S. asiatica* control was also obtained by the CA

practice with the less prolific species *Vigna umbellata* (ricebean), other mechanisms should be involved as well.

Striga control obtained by the agronomic practices of CA can be enhanced by integration of a *Striga*-resistant rice variety such as NERICA-4. Inclusion of a resistant rice variety even has a strong residual control effect, as evidenced by the reduced *Striga*-infection levels in the following maize crop. The combination of CA practices and a resistant variety proved however not enough to entirely prevent *S. asiatica* parasitism and seed bank increase. Additional measures, such as hand-pulling of escaping *S. asiatica* plants before flowering, would therefore be required for effective and long term control.

Acknowledgments

This study was funded by the CGIAR Research Program entitled Global Rice Science Partnership (GRiSP) and the African Development Bank (AfDB) as part of the project “Support to Agricultural Research for Development of Strategic Crops in Africa (SARD-SC)”. Roger Michellon (retired from CIRAD) and Narcisse Moussa (GSDM) are kindly acknowledged for their decisive contributions to the experimental design and technical advice and support. We thank Ibnou Dieng (AfricaRice) and Philippe Letourmy (CIRAD) for their advice and assistance with the statistical data analyses.

References

- Aliyu, L., Lagoke, S.T.O., Carsky, R.J., Kling, J., Omatayo, O., Shebayan, J.Y., 2004. Technical and economic evaluation of some *Striga* control packages in maize in the Nigerian Guinea Savanna. *Crop Prot.* 23, 65–69.
- Balasubramanian, V., Sie, M., Hijmans, R.J., Otsuka, K., 2007. Increasing rice production in sub-saharan Africa: challenges and opportunities. *Adv. Agron.* 94, 55–133.
- Bruelle, G., Naudin, K., Scopel, E., Domas, R., Rabeharisoa, L., Titttonell, P., 2015. Short- to mid-term impact of conservation agriculture on yield variability of upland rice: evidence from farmer's fields in Madagascar. *Exp. Agric.* 51, 66–84.
- Burton, M.G., Mortensen, D.A., Marx, D.B., 2005. Environmental characteristics affecting *Helianthus annuus* distribution in a maize production system. *Agric. Ecosyst. Environ.* 111, 30–40.
- Cairns, J.E., Sonder, K., Zaidi, P.H., Verhulst, N., Mahuku, G., Babu, R., Nair, S.K., Das, B., Govaerts, B., Vinayan, M.T., Rashid, Z., Noor, J.J., Devi, P., Vicente, F.S., Prasanna, B.M., 2012. Maize production in a changing climate: impacts, adaptation and mitigation strategies. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Adv. Agron.* 114, pp. 1–58.
- Carsky, R.J., Singh, L., Ndiakawa, R., 1994. Suppression of *Striga hermonthica* on sorghum using a cowpea intercrop. *Exp. Agric.* 30, 349–358.
- Chikoye, D., Ekeleme, F., Lum, A.F., Schulz, S., 2008. Legume-maize rotation and nitrogen effects on weed performance in the humid and subhumid tropics of West Africa. *Crop Prot.* 27, 638–647.
- Cissoko, M., Boissard, A., Rodenburg, J., Press, M.C., Scholes, J.D., 2011. New Rice for Africa (NERICA) cultivars exhibit different levels of post-attachment resistance against the parasitic weeds *Striga hermonthica* and *Striga asiatica*. *New Phytol.* 192, 952–963.
- De Groote, H., Wangare, L., Kanampiu, F., Odendo, M., Diallo, A., Karaya, H., Friesen, D., 2008. The potential of an herbicide resistant maize technology for *Striga* control in Africa. *Agric. Syst.* 97, 83–94.
- Dusserre, J., Chopart, J.L., Douzet, J.M., Rakotoarisoa, J., Scopel, E., 2012. Upland rice production under conservation agriculture cropping systems in cold conditions of tropical highlands. *Field Crop. Res.* 138, 33–41.
- Ellis-Jones, J., Schulz, S., Douthwaite, B., Hussaini, M.A., Oyewole, B.D., Olanrewaju, A.S., White, R., 2004. An assessment of integrated *Striga hermonthica* control and early adoption by farmers in Northern Nigeria. *Exp. Agric.* 40, 353–368.
- Gbehounou, G., Adango, E., 2003. Trap crops of *Striga hermonthica*: in vitro identification and effectiveness in situ. *Crop Prot.* 22, 395–404.
- Geiger, U., Kroschel, J., Sauerborn, J., 1996. *Striga asiatica*, a problem in the Middle West of Madagascar. In: Moreno, M.T., Cubero, J.J., Berner, D.K., Joel, D., Musselman, L.J., Parker, C. (Eds.), *Advances in Parasitic Research. Proceedings of the Sixth International Parasitic Weed Symposium*. Sevilla, pp. 479–486.
- Giller, K.E., Witter, E., Corbeels, M., Titttonell, P., 2009. Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: the heretics' view. *Field Crop. Res.* 114, 23–34.
- Giller, K., 2001. *Nitrogen Fixation in Tropical Cropping Systems*. CAB International, Wallingford, Oxfordshire, UK.
- Hartman, G.L., Tanimonure, O.A., 1991. Seed populations of *Striga* species in Nigeria. *Plant Dis.* 75, 494–496.
- Institute, S., 2011. The SAS System for Windows; Version 9.2. SAS Institute Inc Cary, NC, USA.
- Jamil, M., Rodenburg, J., Charnikhova, T., Bouwmeester, H.J., 2011. Pre-attachment *Striga hermonthica* resistance of New Rice for Africa (NERICA) cultivars based on low strigolactone production. *New Phytol.* 192, 964–975.
- Jamil, M., Kanampiu, F.K., Karaya, H., Charnikhova, T., Bouwmeester, H.J., 2012. *Striga hermonthica* parasitism in maize in response to N and P fertilisers. *Field Crop. Res.* 134, 1–10.
- Johnson, D.E., Riches, C.R., Diallo, R., Jones, M.J., 1997. *Striga* on rice in West Africa; crop host range and the potential of host resistance. *Crop Prot.* 16, 153–157.
- Jones, M.P., Dingkuhn, M., Aluko, G.K., Semon, M., 1997. Interspecific *Oryza sativa* L x *O. glaberrima* Steud. progenies in upland rice improvement. *Euphytica* 94, 237–246.
- Kamara, A.Y., Ellis-Jones, J., Amaza, P., Omoigui, L.O., Helsen, J., Dugje, I.Y., Kamai, N., Menkir, A., White, R.W., 2008. A participatory approach to increasing productivity of maize through *Striga hermonthica* control in northeast Nigeria. *Exp. Agric.* 44, 349–364.
- Kamara, A.Y., Ekeleme, F., Jibrin, J.M., Tarawali, G., Tofa, I., 2014. Assessment of level, extent and factors influencing *Striga* infestation of cereals and cowpea in a Sudan Savanna ecology of Northern Nigeria. *Agric. Ecosyst. Environ.* 188, 111–121.
- Khan, Z.R., Midega, C.A.O., Bruce, T.J.A., Hooper, A.M., Pickett, J.A., 2010. Exploiting phytochemicals for developing a 'push-pull' crop protection strategy for cereal farmers in Africa. *J. Exp. Bot.* 61, 4185–4196.
- Kiwi, A., Imo, M., Jama, B., Okalebo, J.R., 2009. Coppicing improved fallows are profitable for maize production in *Striga* infested soils of Western Kenya. *Agrofor. Syst.* 76, 455–465.
- Knowler, D., Bradshaw, B., 2007. Farmers' adoption of conservation agriculture: a review and synthesis of recent research. *Food Policy* 32, 25–48.
- Kulkarni, S.S., Dossall, L.M., Spence, J.R., Willenborg, C.J., 2015. Depth of seed burial and gender influence weed seed predation by three species of ground beetle (Coleoptera: carabidae). *Weed Sci.* 63, 910–915.
- Midega, C.A.O., Pittchar, J., Salifu, D., Pickett, J.A., Khan, Z.R., 2013. Effects of mulching, N-fertilization and intercropping with *Desmodium uncinatum* on *Striga hermonthica* infestation in maize. *Crop Prot.* 44, 44–49.
- Mohamed, K.I., Musselman, L.J., Riches, C.R., 2001. The genus *Striga* (Scrophulariaceae) in Africa. *Ann. Missouri Bot. Garden* 88, 60–103.
- Naudin, K., Hussain, O., Scopel, E., Auzoux, S., Giner, S., Giller, K.E., 2015a. PRACT (Prototyping Rotation and Association with Cover crop and no Till) – a tool for designing conservation agriculture systems. *Eur. J. Agron.* 69, 21–31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2015.05.003>.
- Naudin, K., Bruelle, G., Salgado, P., Penot, E., Scopel, E., Lubbers, M., de Ridder, N., Giller, K.E., 2015b. Trade-offs around the use of biomass for livestock feed and soil cover in dairy farms in the Alaotra lake region of Madagascar. *Agric. Syst.* 134, 36–47.
- Oswald, A., Ransom, J.K., Kroschel, J., Sauerborn, J., 2002. Intercropping controls *Striga* in maize based farming systems. *Crop Prot.* 21, 367–374.
- Pullaro, T.C., Marino, P.C., Jackson, D.M., Harrison, H.F., Keinath, A.P., 2006. Effects of killed cover crop mulch on weeds, weed seeds, and herbivores. *Agric. Ecosyst. Environ.* 115, 97–104.
- Ransom, J.K., 2000. Long-term approaches for the control of *Striga* in cereals: field management options. *Crop Prot.* 19, 759–763.
- Ratnadass, A., Randriamanantsoa, R., Rajaonera, T.E., Rabearisoa, M.Y., Rafamantanantsoa, E., Moussa, N., Michellon, R., 2013. Interaction between cropping systems and white grub (Coleoptera: scarabaeoidea) status (pest or beneficial) on upland rice. *Cah. Agric.* 22, 432–441.
- Rodenburg, J., Bastiaans, L., Kropff, M.J., van Ast, A., 2006. Effects of host plant genotype and seedbank density on *Striga* reproduction. *Weed Res.* 46, 251–263.
- Rodenburg, J., Cissoko, M., Kayeke, J., Dieng, I., Khan, Z.R., Midega, C.A.O., Onyuka, E.A., Scholes, J.D., 2015. Do NERICA rice cultivars express resistance to *Striga hermonthica* (Del.) Benth. and *Striga asiatica* (L.) Kuntze under field conditions? *Field Crop. Res.* 170, 83–94.
- Rodenburg, J., Demont, M., Zwart, S.J., Bastiaans, L., 2016. Parasitic weed incidence and related economic losses in rice in Africa. *Agric. Ecosyst. Environ.* 235, 306–317.
- Rodenburg, J., Cissoko, M., Kayongo, N., Dieng, I., Bisikwa, J., Irakiza, R., Masoka, I., Midega, C.A.O., Scholes, J.D., 2017. Genetic variation and host-parasite specificity of *Striga* resistance and tolerance in rice: the need for predictive breeding. *New Phytol.* 214, 1267–1280.
- Rotaru, V., Sinclair, T.R., 2009. Interactive influence of phosphorus and iron on nitrogen fixation by soybean. *Environ. Exp. Bot.* 66, 94–99.
- Saito, K., Azuma, K., Oike, S.O., 2010. Combined effects of *Stylosanthes guianensis* fallow and tillage management on upland rice yield: weeds and soils in southern Benin. *Soil Till. Res.* 107, 57–63.
- Schulz, S., Hussaini, M.A., Kling, J.G., Berner, D.K., Ikie, F.O., 2003. Evaluation of integrated *Striga hermonthica* control technologies under farmer management. *Exp. Agric.* 39, 99–108.
- Schut, M., Rodenburg, J., Klerkx, L., Hinnou, L.C., Kayeke, J., Bastiaans, L., 2015. Participatory appraisal of institutional and political constraints and opportunities for innovation to address parasitic weeds in rice. *Crop Prot.* 74, 158–170.
- Scopel, E., Triomphe, B., Affholder, F., Da Silva, F.A.M., Corbeels, M., Xavier, J.H.V., Lahmar, R., Recous, S., Bernoux, M., Blanchart, E., Mendes, I.D., De Tourdonnet, S., 2013. Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 113–130.
- Seck, P.A., Diagne, A., Mohanty, S., Wopereis, M.C.S., 2012. Crops that feed the world 7: Rice. *Food Secur.* 4, 7–24.
- Sester, M., Raveloson, H., Tharreau, D., Dusserre, J., 2014. Conservation agriculture cropping system to limit blast disease in upland rainfed rice. *Plant Pathol.* 63, 373–381.
- Sester, M., Craheix, D., Daudin, G., Sirdey, N., Scopel, E., Angevin, F., 2015. Assessment of the sustainability of conservation agriculture cropping systems in Madagascar (Alaotra Lake) using MASC-Mada. *Cah. Agric.* 24, 123–133.
- Shiferaw, B., Prasanna, B.M., Hellin, J., Banziger, M., 2011. Crops that feed the world 6: Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security. *Food Sec.* 3, 307–327.
- Smaling, E.M.A., Fresco, L.O., deJager, A., 1996. Classifying, monitoring and improving

- soil nutrient stocks and flows in African agriculture. *Ambio* 25, 492–496.
- Sokal, R.R., Rohlf, F.J., 1995. *Biometry: the Principles and Practice of Statistics in Biological Research*. W.H Freeman, New York, USA.
- Tesso, T.T., Ejeta, G., 2011. Integrating multiple control options enhances striga management and sorghum yield on heavily infested soils. *Agron. J.* 103, 1464–1471.
- Thierfelder, C., Wall, P.C., 2009. Effects of conservation agriculture techniques on infiltration and soil water content in Zambia and Zimbabwe. *Soil Till. Res.* 105, 217–227.
- Thierfelder, C., Wall, P.C., 2012. Effects of conservation agriculture on soil quality and productivity in contrasting agro-ecological environments of Zimbabwe. *Soil Use Manage.* 28, 209–220.
- Vanlauwe, B., Wendt, J., Giller, K.E., Corbeels, M., Gerard, B., Nolte, C., 2014. A fourth principle is required to define Conservation Agriculture in sub-saharan Africa: the appropriate use of fertilizer to enhance crop productivity. *Field Crop. Res.* 155, 10–13.
- Westerman, P.R., van Ast, A., Stomph, T.J., Van Der Werf, W., 2007. Long-term management of the parasitic weed *Striga hermonthica*: strategy evaluation with a population model. *Crop Prot.* 26, 219–227.
- Yoder, J.I., Scholes, J.D., 2010. Host plant resistance to parasitic weeds; recent progress and bottlenecks. *Curr. Opin. Plant Biol.* 13, 478–484.
- Yoneyama, K., Xie, X.N., Kisugi, T., Nomura, T., Yoneyama, K., 2013. Nitrogen and phosphorus fertilization negatively affects strigolactone production and exudation in sorghum. *Planta* 238, 885–894.
- van Ast, A., Bastiaans, L., 2006. The role of infection time in the differential response of sorghum cultivars to *Striga hermonthica* infection. *Weed Res.* 46, 264–274.
- van Ast, A., Bastiaans, L., Katile, S., 2005. Cultural control measures to diminish sorghum yield loss and parasite success under *Striga hermonthica* infestation. *Crop Prot.* 24, 1023–1034.
- van Delft, G.J., Graves, J.D., Fitter, A.H., Pruiksma, M.A., 1997. Spatial distribution and population dynamics of *Striga hermonthica* seeds in naturally infested farm soils. *Plant Soil* 195, 1–15.
- van Mourik, T.A., Bianchi, F.J.J.A., Van Der Werf, W., Stomph, T.J., 2008. Long-term management of *Striga hermonthica*: strategy evaluation with a spatio-temporal population model. *Weed Res.* 48, 329–339.

***Striga asiatica* (L.) Kuntze agroecological management based on rice-maize cropping systems in the Mid West of Vakinankaratra-Madagascar**

Abstract

Striga asiatica (L.) Kuntze is a hemiparasitic plant of grasses. It causes yield losses for rainfed crops, rice and maize in the Middle West of Vakinankaratra mid-altitude region (800 to 1300 masl.). Various agroecological practices based on the Conservation Agriculture (CA) model have been tested in field over four years to evaluate their control potential on *S. asiatica* L. (Kuntze).

Three CA systems based on continuous rice-corn biennial rotations, CACM (maize-associated cowpea and *Mucuna*), CARB (maize-associated rice-bean) and CAST (maize associated with *Stylosanthes*) were compared with a conventional control system with tillage without maize-associated legume in interaction with three rice varieties selected for their decreasing degree of susceptibility to *S. asiatica*, respectively B22, NERICA-9 and NERICA-4. The large-scale device (1.6 ha) was used to monitor indicators on the parasitic plant, plants grown with their grain and straw biomass, regular surface soil analyzes, and occasionally weed surveys in the plot, and estimates of soil erosion potential. This experimental device was also based on an annual field study with an artificial *S. asiatica* infestation.

In crops associated with cover crops, the infestation of *S. asiatica* was reduced by 95% and 97% respectively for rice and maize with CAST combined with NERICA-4. For this same variety and for both crops, a delay in the emergence of *S. asiatica* from 7 to 10 days was also noted. At the end of the experiment, AC soils, 0-10 cm deep, contained about 5 times less seed of *S. asiatica* compared to those under CONV. At the same time, weed biomass on rice in CONV and CAST was significantly lower by about 25% than for CACM and CARB. Then, for rice cultivation associated with legume mulches, *Mucuna* mulch delayed the emergence of *S. asiatica* by 7 days. At 70 and 85 JAS, the density of *S. asiatica* on these mulches remained similar to the control, whereas on *Stylosanthes* mulch it was 68% and 30% respectively higher than this control. At the crop production level, rice yields in CACM, on average, were significantly higher by 19% compared to other treatments. The improvement in yields is achieved as early as the 2nd season with CACM or 3rd season with CAST compared to the CONV system. For corn, yields were relatively lower than 1 t.ha⁻¹ for all treatments. However, their biomass associated with *Stylosanthes* was on average five times higher than the CONV control. Finally for the soil, with CAST also, the total nitrogen was 11% more than on the control at a depth of 0-10 cm.

This study showed the effectiveness of short and medium CA cropping systems positive effects on agroecological *S. asiatica* management, as good rice productivity. Future challenges will concern the testing of other legume crops in CA-based cropping systems to improve both their economic and social attractiveness.

Keywords: *Striga asiatica*, conservation agriculture, infestation, cropping systems, *Stylosanthes*, NERICA-4.

Author : Meva Tahiry RANDRIANJAFIZANAKA
Thesis supervisor : Isabelle RATSIMALA RAMONTA
Thesis Co-supervisor : Jonne RODENBURG

Contacts :
rmtahiry@yahoo.fr
ramonta@moov.mg
j.rodenburg@greenwich.uk

Gestion agroécologique de *Striga asiatica* (L.) Kuntze à base de systèmes de culture riz-maïs dans le Moyen Ouest du Vakinankaratra-Madagascar

Résumé

Striga asiatica (L.) Kuntze est une plante hémiparasite des graminées. Il cause des pertes de rendement pour les cultures pluviales, riz et maïs, dans la région du Moyen Ouest du Vakinankaratra de moyenne altitude (800 à 1300 m). Différentes pratiques agroécologiques basées sur le modèle de l'Agriculture de Conservation (AC) ont été testées au champ sur quatre années pour évaluer leur potentiel de contrôle sur *S. asiatica* L. (Kuntze).

Trois systèmes en AC basés sur des rotations biennales continues riz-maïs, ACNM (maïs associé au *Mucuna* et niébé), ACHR (maïs associé au haricot-riz) et ACST (maïs associé au *Stylosanthes*) ont été comparés avec un témoin en système conventionnel (CONV) avec labour sans légumineuse associée au maïs, en interaction avec trois variétés de riz choisies pour leur degré décroissant de sensibilité au *S. asiatica*, respectivement B22, NERICA-9 et NERICA-4. Le dispositif de grande taille (1,6 ha) a permis de réaliser un suivi d'indicateurs sur la plante parasite, les plantes cultivées avec leurs biomasses en grain et paille, des analyses régulières de sol en surface, et ponctuellement des relevés des mauvaises herbes, des estimations du potentiel d'érosion du sol. Ce dispositif expérimental s'est appuyé également sur une étude annuelle en champ avec une infestation artificielle de *S. asiatica*.

Dans les cultures associées avec les plantes de couverture, l'infestation de *S. asiatica* a été réduite de 95 % et 97 % respectivement pour le riz et le maïs avec ACST combinés au NERICA-4. Pour cette même variété et pour les deux cultures, un retard de la levée de *S. asiatica* de 7 à 10 jours a été aussi remarqué. A la fin de l'expérimentation, les sols en AC, sur 0-10 cm de profondeur, ont contenu environ 5 fois moins de semences de *S. asiatica* par rapport à ceux sous CONV. A la même période, la biomasse des mauvaises herbes sur le riz dans CONV et ACST a été significativement inférieure d'environ 25 % que pour celles en ACNM et ACHR. Ensuite, pour la culture de riz associée aux paillages des légumineuses, les paillis de *Mucuna* ont retardé la levée de *S. asiatica* de 7 jours. A 70 et 85 JAS, la densité de *S. asiatica* sur ces paillis est restée similaires au témoin sol nu, alors que sur paillis de *Stylosanthes*, elle a été respectivement de 68 % et 30 % plus élevée que ce témoin. Au niveau de la production des cultures, les rendements du riz en ACNM, en moyenne, ont été significativement supérieurs de 19 % par rapport aux autres traitements. L'amélioration des rendements est atteinte dès la 2^{ème} campagne culturale avec ACNM ou en 3^{ème} campagne avec ACST par rapport au système CONV. Concernant le maïs, les rendements ont été relativement, inférieurs à 1 t.ha⁻¹ pour tous les traitements. Cependant, leur biomasse associée au *Stylosanthes* ont été en moyenne cinq fois supérieures au témoin CONV. Enfin pour le sol, avec ACST également, l'azote total a été de 11 % de plus que sur le témoin sur une profondeur de 0-10 cm.

Cette étude a montré une efficacité des systèmes de culture en AC à court et moyen termes sur la gestion agroécologique de *S. asiatica*, et aussi une bonne productivité de la culture du riz pluviale. Comme perspectives, tester des légumineuses locales dans les rotations culturales permettrait d'envisager d'autres stratégies de lutte économiquement et socialement plus attractives.

Mots-clés : *Striga asiatica*, agriculture de conservation, infestation, systèmes de culture, *Stylosanthes*, NERICA-4.

Auteur : Meva Tahiry RANDRIANJAFIZANAKA
Directeur de thèse : Isabelle RATSIMALA RAMONTA
Co-Directeur de thèse : Jonne RODENBURG

Contacts :
rmtahiry@yahoo.fr
ramonta@moov.mg
j.rodenburg@greenwich.uk